

Développement d'une approche d'estimation de l'impact des
plantes sur les charges d'un espace d'agriculture
intégrée au bâtiment

par

Marie-Hélène TALBOT

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION
ÉNERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 28 JANVIER 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Marie-Hélène Talbot, 2018



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE RAPPORT DE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Danielle MONFET, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel ROUSSE, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Stanislaw KAJL, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 18 DÉCEMBRE 2018

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier ma directrice de recherche, Danielle Monfet, qui m'a confié un projet de recherche motivant ainsi que d'autres responsabilités variées. Ces expériences m'ont permis d'acquérir de nombreuses compétences académiques. Merci de m'avoir soutenue, ta compréhension ainsi que ta rigueur m'ont permis de me dépasser.

Un énorme merci à mes parents qui ont appuyé toutes mes grandes décisions, particulièrement celle de retourner aux études. Vous m'avez aidé à bâtir ma confiance en soi en me rappelant que j'étais en mesure de relever tous les défis qui se présenteraient à moi. Je suis très chanceuse de vous avoir, votre support inconditionnel m'a permis de me dépasser et de performer dans les projets que j'entreprends.

Je remercie également le Fonds de développement durable de l'association étudiante de l'ÉTS (FDDAÉTS) et le Comité de sélection de l'ÉTS de m'avoir soutenu financièrement durant mes études supérieures.

Je tiens également à remercier mes collègues étudiants, soit Maxime, Kim, Alexandre, Mathilde, Pierre-Luc, Gilbert, Timothé, Frédéric et Frédéric. Vous m'avez tous aidé à un moment ou un autre pendant ces études et je vous en suis très reconnaissante.

Développement d'une approche d'estimation de l'impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégrée au bâtiment

Marie-Hélène TALBOT

RÉSUMÉ

L'agriculture urbaine protégée est une alternative viable à l'agriculture intensive qui permet en climat froid, de maintenir une production maraîchère locale pendant toute l'année. Cela consiste entre autres à installer un système d'agriculture de haute technologie au sein d'un espace d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB) tel qu'un système de culture hydroponique empilée verticalement sous éclairage artificiel. Ce type de système requiert un environnement entièrement contrôlé où des conditions environnementales intérieures (température, humidité, intensité d'éclairage, concentration en CO₂), qui favorisent la productivité agricole, sont maintenues par l'utilisation de systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA) et d'autres systèmes. Afin d'être en mesure de maintenir ces conditions en tout temps, les systèmes CVCA doivent être dimensionnés adéquatement selon les charges maximales. Ces charges sont calculées selon les règles de l'art et les gains internes sont définis de façon subjective par le concepteur ainsi que selon des hypothèses et simplifications. Toutefois, l'intégration du flux de chaleur sensible et latente induits par les plantes au calcul des charges est très peu détaillé et l'impact thermique sensible et latent des plantes est généralement négligé.

L'objectif principal de ce mémoire consiste à développer une approche d'estimation de l'impact des plantes sur les charges d'un eAIB. Pour ce faire, l'impact des plantes sur les charges est évalué à l'aide d'une première étude paramétrique exploratoire. Par la suite, une deuxième étude paramétrique est complétée afin d'évaluer l'impact des plantes sur les charges maximales selon les paramètres de conception.

L'approche choisie consiste à effectuer les deux études de façon subséquente à l'aide du logiciel de simulation énergétique transitoire TRNSYS 18 afin de modéliser un eAIB au sein d'un bâtiment situé en climat froid. À partir de ce modèle, les charges qui n'incluent pas l'impact des plantes, soit le cas de référence, sont évaluées. Puis, en couplant un modèle thermique de plantes (tomates ou laitues) au modèle du bâtiment, les charges qui incluent l'impact des plantes sont évaluées.

La première étude montre que l'impact des plantes sur les charges est significatif pour un cas spécifique d'eAIB. Les résultats permettent d'identifier les flux de chaleur des plantes à considérer pour estimer des charges maximales pour les conditions de conception. La deuxième étude évalue l'impact des plantes sur les charges maximales d'un cas d'eAIB général pour différents paramètres généralement spécifiés par les producteurs. Les résultats montrent que l'impact des plantes sur les charges de chauffage sensible et en refroidissement latent maximales estimées est significatif. En effet, lorsque douze étagères de laitues sous éclairage artificiel sont empilées et cultivées selon une méthode de croissance à stades diversifiés, les charges estimées sont de 3,7 à 4,1 fois plus grandes en chauffage sensible et 1,7 à 6,5 fois plus

VIII

grande en refroidissement latent que les valeurs de références, dépendamment des conditions d'air intérieur (température/humidité relative de 19°C/80% vs. 24°C /70%). Selon une méthode de croissance à un seul stade, les charges obtenues sont de 13,7 à 15,7 fois plus grandes pour la charge de chauffage sensible et de 9,4 à 19,5 fois plus grandes pour la charge de refroidissement latent que les valeurs de référence. Finalement, des flux de chaleur sensibles et latents pour les laitues sont proposés et pourraient être utilisés lors du calcul de charge.

Mots-clés : agriculture intégrée au bâtiment, modèle de plantes, échange thermique, charges du bâtiment, TRNSYS

Development of an Approach to Estimate the Impact of Plants on the Loads of a Building-Integrated Agriculture Space

Marie-Hélène TALBOT

ABSTRACT

Protected urban agriculture is a viable alternative to intensive agriculture, which, in cold climates, makes it possible to maintain local crop production throughout the year. This includes installing a high-tech agriculture system within a building-integrated agriculture space (BIAs) such as a vertically stacked hydroponic system under artificial lighting. This type of system requires a fully controlled environment where indoor environmental conditions (temperature, humidity, lighting intensity, CO₂ concentration), that enhances agricultural productivity, are maintained with the use of heating, ventilation and air conditioning systems (HVAC) and other systems. In order to be able to maintain these conditions at all time, the HVAC systems must be properly sized based on the maximum loads. These loads are calculated according to the rules of the art for internal gains defined subjectively by the designer and according to hypotheses and simplifications. However, the integration of sensible and latent heat fluxes, induced by plants, into load calculations is sparsely detailed and the sensible and latent thermal impacts induced by plants are usually neglected.

The main objective of this thesis consists of developing an approach to estimate the impact of plants on the loads of a BIAs. To do so, the impact of plants on the loads is assessed first using an exploratory parametric study. Then, a second parametric study is completed to assess the impact of the plants on peak loads according to the design parameters.

The chosen approach is to complete both studies subsequently using TRNSYS 18, a transient energy simulation software, in which the BIAs, located within a building in cold climate, is modeled. Using this model, loads without considering the impact of plants, which is the reference case, can be assessed. Then, by coupling a plants (tomatoes or lettuces) thermal model to the building model, loads considering the impact of plants can be assessed.

The first study showed that the impact of plants on loads is significant for a specific case of BIAs. The results made it possible to identify the suitable plants heat fluxes to be considered to estimate peak loads for the design conditions. The second study assessed the impact of plants on the peak loads of a general case of BIAs for various parameters generally specified by the growers. The results showed that the estimated impact of plants on the sensible heating and latent cooling peak loads is significant. Indeed, when twelve shelves of lettuce under artificial lighting are stacked and grown according to a diversified stage's growth method, the estimated sensible heating load is 3.7 to 4.1 times greater and the latent cooling are 1.7 to 6.5 times greater than the reference values, depending on indoor air conditions (temperature/relative humidity of 19°C /80% vs. 24°C /70%). For a single-stage growth method, the loads obtained are 13.7 to 15.7 times greater for the sensible heating load and 9.4 to 19.5 times larger for the latent cooling load than the reference values. Finally, sensible and latent heat fluxes of lettuce are proposed which could be used in load calculations.

Keywords: building-integrated agriculture, plants model, heat exchange, building loads, TRNSYS

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Agriculture urbaine protégée	3
1.1.1 Espaces d'agriculture indépendants	4
1.1.2 Espaces d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB)	6
1.2 Interactions des plantes avec leur environnement	7
1.2.1 Activité végétale	7
1.2.1.1 Photosynthèse et photorespiration	8
1.2.1.2 Respiration	9
1.2.1.3 Transpiration	10
1.2.2 Comportement thermique des plantes	10
1.3 Conditions environnementales intérieures	12
1.3.1 Lumière	12
1.3.2 Température ambiante	13
1.3.3 Humidité	14
1.3.4 Concentration en CO ₂	14
1.4 Systèmes CVCA	14
1.4.1 Ventilation	15
1.4.2 Chauffage	16
1.4.3 Humidification	18
1.4.4 Refroidissement	18
1.4.5 Déshumidification	20
1.5 Autres systèmes	20
1.5.1 Système d'ombrage	20
1.5.2 Système de stockage d'énergie	20
1.5.3 Système d'enrichissement au CO ₂	22
1.5.4 Système d'éclairage artificiel	22
1.6 Modélisation	23
1.7 Perspectives	27
CHAPITRE 2 DÉMARCHE DE RECHERCHE ET CONTRIBUTION ATTENDUE	29
2.1 Démarche de recherche	29
2.1.1 Première étude paramétrique	29
2.1.2 Deuxième étude paramétrique	30
2.2 Contribution attendue	30
CHAPITRE 3 IMPACT DES PLANTES SUR LES CHARGES D'UN EAIB SELON DES PARAMÈTRES EXPLORATOIRES	31
3.1 Modélisation des flux de chaleur induits par les plantes	31
3.2 Approche de modélisation	33

3.2.1	Modèle du bâtiment et de l'eAIB.....	34
3.2.2	Étude paramétrique	36
3.3	Résultats et analyse	38
3.3.1	Densité de culture	38
3.3.2	Éclairage	42
3.3.3	Ventilation.....	46
3.4	Constats.....	48
CHAPITRE 4 IMPACT DES PLANTES SUR LES CHARGES MAXIMALES D'UN EAIB SELON LES PARAMÈTRES DE CONCEPTION51		
4.1	Méthode du calcul des charges	51
4.2	Approche de modélisation	53
4.2.1	Modèle du bâtiment et de l'eAIB.....	54
4.2.2	Modèle de plantes	56
4.2.2.1	Charge de chauffage sensible.....	58
4.2.2.2	Charge de refroidissement sensible	58
4.2.2.3	Charge de refroidissement latent	58
4.2.3	Étude paramétrique	59
4.3	Résultats et analyse	60
4.3.1	Impact des plantes sur la charge de chauffage sensible	60
4.3.2	Impact des plantes sur la charge de refroidissement latent.....	62
4.3.3	Flux de chaleur de chaleur sensible et d'humidité des plantes	64
CHAPITRE 5 DISCUSSION.....67		
5.1	Interprétation des charges maximales estimées	67
5.2	Performances des modèles de plantes.....	69
5.2.1	Modèle de tomates adapté de Ward et al. (2015).....	70
5.2.2	Modèle de laitues de Graamans et al. (2017).....	71
CONCLUSION.....73		
ANNEXE I	DÉTAIL DE LA CONSTRUCTION DES MURS, PLAFOND, PLANCHER, TOIT ET DALLE	75
ANNEXE II	VÉRIFICATION DU CALCUL DES CHARGES D'UNE ZONE INTERNE SOUS LES CONDITIONS DE CONCEPTION DANS TRNSYS	77
ANNEXE III	CODES DES MODÈLES DE PLANTES	81
ANNEXE IV	FLUX DE CHALEUR DES LAITUES.....	99
BIBLIOGRAPHIE.....101		

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Température ambiante optimale selon le type de plante cultivée13
Tableau 3.1	Comparaison des modèles de plantes31
Tableau 3.2	Détails des flux d'énergie considérés pour les modèles de plantes développés.....32
Tableau 3.3	Gains latents et sensibles des tomates selon l'intensité de l'éclairage.....44
Tableau 4.1	Conditions environnementales intérieures de l'eAIB.....55
Tableau 4.2	Proposition des paramètres des plantes et leurs valeurs à utiliser pour estimer les charges maximales.....59
Tableau 4.3	Paramètres de l'étude paramétrique59

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Diverses formes d'agriculture urbaine protégée.....3
Figure 1.2	Formes de serres communes tirée de Bastien (2015).....5
Figure 1.4	Bilan d'énergie de la plante11
Figure 1.5	Serre expérimentale avec capteur sélectif tirée de Tadili et Dahman (1997).....17
Figure 1.6	Refroidissement de l'air au-dessous du point de rosée avec déshumidification tirée de Lazzarin et Nalini (2004)19
Figure 1.7	Système solaire hybride d'économie d'énergie tirée de Ntinis et al. (2014).....21
Figure 1.8	Différents volumes de contrôle étudiés tirée de Ha et al. (2015).....25
Figure 3.1	Interactions entre les modèles34
Figure 3.2	(a) Répartition des espaces dans le bâtiment et (b) vue intérieure de l'eAIB35
Figure 3.3	Conditions extérieures (température bulbe sec et humidité absolue) pour une journée d'hiver et d'été typique37
Figure 3.4	Impact de la densité de culture sur les charges (a) sensibles et (b) latentes en hiver de l'eAIB39
Figure 3.5	Impact de la densité de culture sur les charges (a) sensibles et (b) latentes en été de l'eAIB40
Figure 3.6	Impact des plantes sur les charges sensibles de l'eAIB selon la densité de culture.....41
Figure 3.7	Impact des plantes sur les charges latentes de l'eAIB selon la densité de culture.....42
Figure 3.8	Impact de l'intensité d'éclairage sur les charges (a) sensibles et (b) latentes en hiver de l'eAIB43

Figure 3.9	Impact des plantes sur les charges sensibles de l'eAIB selon l'intensité de l'éclairage.....	45
Figure 3.10	Impact des plantes sur les charges latentes de l'eAIB selon l'intensité de l'éclairage.....	46
Figure 3.11	Impact du débit de ventilation sur les charges (a) sensibles et (b) latentes en hiver de l'eAIB	47
Figure 3.12	Impact du débit de ventilation sur les charges (a) sensibles et (b) latentes en été de l'eAIB.....	47
Figure 4.1	Flux de chaleur dans une zone thermique tirée de ASHRAE (2013b)	52
Figure 4.2	Résumé de l'approche de modélisation	53
Figure 4.3	Répartitions des espaces	54
Figure 4.4	Conditions extérieures des jours de conception à 0,4% en refroidissement sensible (jaune) et latent (mauve) et à 99,6% en chauffage sensible (bleu) et latent (rouge).....	55
Figure 4.5	Variation de la charge de chauffage sensible maximale de l'eAIB selon la densité de culture pour un taux de ventilation de 0.02h ⁻¹ totale (gauche) et par unité de surface (droite)	61
Figure 4.6	Variation de la charge de refroidissement latent maximale de l'eAIB selon la densité de culture pour un taux de ventilation de 0.02h ⁻¹ totale (gauche) et par unité de surface (droite)	63
Figure 4.7	Flux de chaleur sensible des plantes en respiration pour LAI=2.1 (gauche) et LAI=10 (droite).....	65
Figure 4.8	Flux de chaleur latente émis par les plantes en photosynthèse pour LAI=2.1 (gauche) et LAI=10 (droite).....	66

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CAC	Couverture par les feuilles de l'aire cultivée
CLF	<i>Cooling Load Factor</i>
CLTD	<i>Cooling Load Temperature Difference</i>
CO ₂	Dioxyde de carbone
CVCA	Chauffage, ventilation et conditionnement d'air
DC	Densité de culture
DEL	Diode électroluminescente
eAIB	Espace d'agriculture intégrée au bâtiment
HBM	<i>Heat Balance Method</i>
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
PFAL	<i>Plant Factory with Artificial Light</i>
PRG	Potentiel de réchauffement global
O ₂	Dioxygène
RPA	Rayonnement photosynthétique actif
RTSM	<i>Radiant Time Series Method</i>
SLF	<i>Solar Load Factor</i>
TFM	<i>Transfer Function Method</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

α_{pl}	Coefficient d'absorption de la lumière visible des plantes [-]
ACH_{inf}	Débit d'infiltration [h^{-1}]
ACH_{vent}	Débit de ventilation [h^{-1}]
h_{conv}	Coefficient de convection [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
$I_{éclairage}$	Puissance des lampes DEL selon la superficie de plancher [$W \cdot m^{-2}$]
k_l	Coefficient d'extinction des plantes [-]
LAI	Ratio de l'aire de feuilles sur l'aire cultivée [-]
q_{rad_abs}	Flux d'énergie radiative (visible) absorbée par les plantes [W]
q_{rad_soleil}	Flux d'énergie radiative (visible) émis par le soleil [W]
q_{rad_lampes}	Flux d'énergie radiative (visible) émis par les lampes [W]
q_{abs}	Flux d'énergie absorbée par les plantes [W]
q_{conv}	Flux d'énergie convective échangée [W]
q_{env}	Flux d'énergie radiative (infrarouge) échangée [W]
q_{latent}	Flux d'énergie latente échangée [W]
q_{morph}	Flux d'énergie utile aux plantes [W]
q_{st}	Flux d'énergie stockée [W]
Q_{latent}	Charge latente [kW]
$Q_{sensible}$	Charge sensible [kW]
r_a	Résistance aérodynamique de la couche limite [s/m]
r_{st}	Résistance stomatique [s/m]
T_{amb}	Température ambiante [$^{\circ}C$]
T_{ciel}	Température du ciel [$^{\circ}C$]

T_{pl}	Température de la plante [°C]
U_{∞}	Vitesse de l'écoulement d'air sur la plante [m/s]
vpd	Différentiel de pression partielle de vapeur d'eau entre les plantes et leur environnement [kPa]
w_{amb}	Humidité absolue ambiante (kg d'eau/kg d'air sec)

INTRODUCTION

Alors que l'insécurité alimentaire ne cesse d'augmenter mondialement et que les effets du réchauffement planétaire se font de plus en plus sentir, le mode de vie occidental est remis en question, tout particulièrement l'agriculture intensive. Pour répondre à ce problème, le concept d'agriculture urbaine est en plein essor puisqu'il s'agit d'une solution durable contrairement à l'agriculture conventionnelle qui a de nombreux effets néfastes sur l'environnement et d'importantes limites de production (Despommier, 2013). En climat froid, tel qu'au Québec, pour obtenir une production maraîchère hors saison, des installations d'agriculture urbaine protégée (McCartney & Lefsrud, 2018) sont nécessaires. Ces solutions consistent entre autres à installer un système de culture au sein d'un entrepôt, d'un conteneur maritime revalorisé, d'une serre (au toit d'un bâtiment ou au sol) ou d'un espace d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB). Un eAIB est un espace dans ou sur un bâtiment où, par exemple, un système d'agriculture hydroponique empilé verticalement est utilisé (Puri & Caplow, 2009). Deux types d'eAIB se distinguent, soit celui qui reçoit de l'éclairage naturel et qui peut, au besoin, bonifier la période d'éclairage à l'aide de lampes ou celui selon lequel seulement de l'éclairage artificiel est utilisé. Dans les deux cas, des conditions environnementales intérieures (température, humidité, intensité d'éclairage, concentration en CO₂) favorisant la productivité agricole sont maintenues par l'utilisation de systèmes de chauffage, ventilation et conditionnement d'air (CVCA) et d'autres systèmes. Pour s'assurer que les conditions soient maintenues en tout temps, les systèmes CVCA sont généralement conçus à partir des charges maximales de l'eAIB. Celles-ci sont calculées selon des méthodes qui prennent en considération les gains internes qui sont définis subjectivement par le concepteur ainsi que selon des hypothèses et simplifications (Spitler, 2014).

Or, l'intégration du flux de chaleur sensible et latente émis par les plantes au calcul des charges a été très peu détaillée. En effet, par leur complexité, l'interaction multifactorielle des plantes avec leur environnement a souvent été négligé lors de la modélisation d'espace d'agriculture, même si cela n'est pas recommandé (Sethi, Sumathy, Lee, & Pal, 2013). En effet, dans certains cas, les plantes peuvent interagir de manière significative avec leur environnement (Ward &

Choudhary, 2014). De plus, la modélisation des plantes est souvent difficile puisque les procédés biologiques des plantes font toujours l'objet de recherche en horticulture et sont spécifiques à chaque plante.

L'objectif principal de cette étude est de développer une approche d'estimation de l'impact thermique, sensible et latent, des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégrée au bâtiment. Pour y parvenir, les éléments suivants sont complétés :

- Évaluer l'impact des plantes sur les charges d'un eAIB ;
- Évaluer l'impact des plantes sur les charges maximales d'un eAIB selon les paramètres de conception (ASHRAE, 2007b).

Pour atteindre cet objectif, l'approche choisie consiste à effectuer deux études paramétriques subséquentes à l'aide du logiciel de simulation énergétique TRNSYS 18 (Klein et al., 2017) au sein duquel l'eAIB est modélisé afin de déterminer les charges avec et sans plantes. L'impact thermique des plantes est déterminé à l'aide d'un modèle de plantes.

Le chapitre 1 présente une revue de la littérature sur l'agriculture urbaine protégée, les interactions entre les plantes et leur environnement, les conditions environnementales intérieures à maintenir, les systèmes CVCA, les autres systèmes nécessaires, la modélisation d'espaces d'agriculture et les perspectives. Le chapitre 2 présente la démarche de recherche et la contribution attendue. Le chapitre 3 présente la première étude paramétrique portant sur l'estimation de l'impact des plantes sur les charges d'un eAIB. Le chapitre 4 présente la deuxième étude paramétrique portant sur l'estimation de l'impact des plantes sur les charges de maximales d'un eAIB. Chaque étude présente son cadre théorique, la méthodologie utilisée, les résultats et leurs analyses. Le chapitre 5 présente la discussion portant sur les deux études. Ce mémoire sera clôturé par une conclusion et différentes annexes.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Agriculture urbaine protégée

L'agriculture urbaine protégée propose un espace où des conditions environnementales intérieures favorisant la croissance des plantes sont maintenues en tout temps (McCartney & Lefsrud, 2018). Ce concept regroupe différents types d'espace tel que présenté à la Figure 1.1. En général, les formes les plus étudiées d'agriculture urbaine protégée sont les serres au sol et au toit ainsi que les *plant factory*.

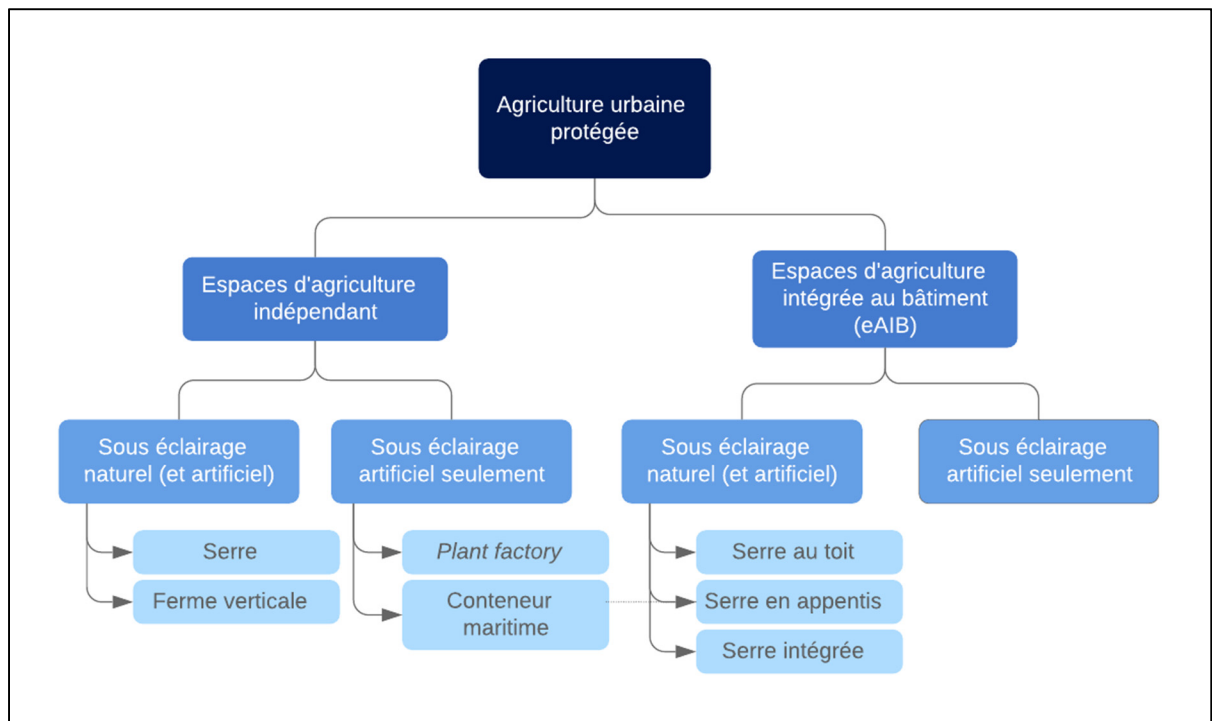


Figure 1.1 Diverses formes d'agriculture urbaine protégée

1.1.1 Espaces d'agriculture indépendants

Les espaces d'agriculture indépendants incluent entre autres les serres, les *plant factory* ainsi que d'autres types d'espaces émergents tels que les conteneurs maritimes convertis et les fermes verticales.

La serre permet de cultiver des plantes en dehors de la saison d'agriculture à l'aide de l'énergie solaire qu'elle capte. Cette énergie qui permet la photosynthèse des plantes chauffe également l'espace d'agriculture, ce qui permet d'allonger la saison agricole. La serre peut accueillir une culture plus traditionnelle en terre ou encore des semis. Elle peut également accueillir des systèmes de plus haute technologie qui permettent de cultiver sans terre par l'utilisation d'un système de culture hydroponique. Enfin, lorsque les conditions environnementales intérieures sont peu contrôlées, elles deviennent extrêmement sensibles aux gains solaires. En effet, ces gains, qui varient chaque heure, engendrent de grandes variations de température et d'humidité.

Plusieurs aspects ont été étudiés par rapport à la conception d'une serre (ASHRAE, 2011). Les deux principaux aspects à considérer sont la forme et l'enveloppe ainsi que l'orientation. Il existe différentes formes de serres, les plus communes sont présentées à la Figure 1.2. Différentes options de matériaux pour l'enveloppe sont aussi possibles : verre, fibre de verre, pellicule plastique, etc. Chaque matériau a des caractéristiques spécifiques qui, dépendamment de la pente du toit, ont un grand impact sur la transmittivité de la lumière photosynthétique active.

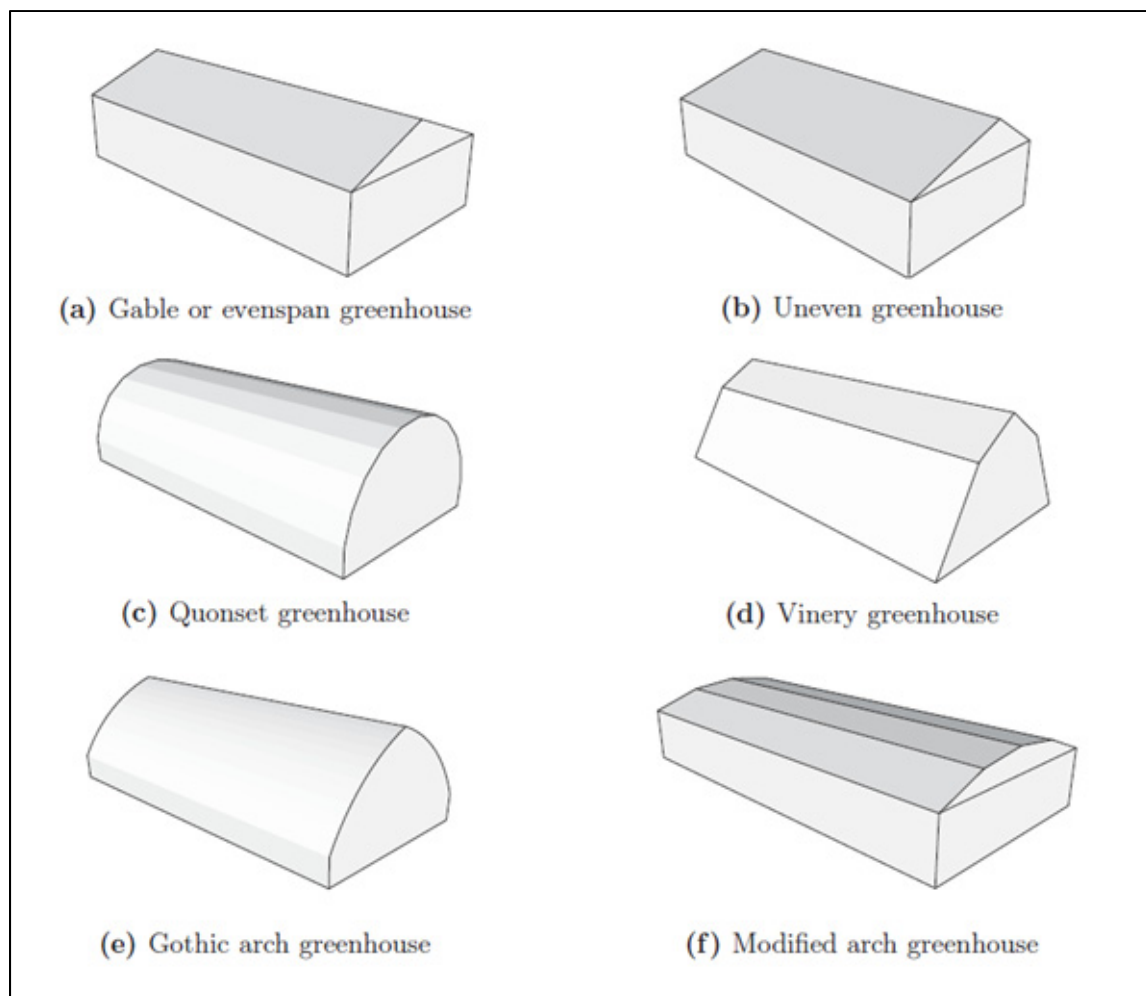


Figure 1.2 Formes de serres communes tirée de Bastien (2015)

En termes d'orientation, il est recommandé d'orienter la serre de façon à maximiser la transmission des rayons solaires lors des journées les moins ensoleillées d'hiver. En Amérique du Nord, une orientation est-ouest maximise la transmission des rayons provenant du sud en hiver. Il est également recommandé de protéger la serre des vents à l'aide de végétation locale, comme des conifères, afin de limiter les pertes de chaleur par convection et infiltration.

Pour ce qui est d'un *plant factory*, aussi nommé *plant factory with artificial light* (PFAL), c'est un bâtiment qui a pour unique vocation la culture hydroponique ou aéroponique empilée verticalement sous éclairage artificiel et ce, sans aucune lumière naturelle (Kozai, Niu, & Takagaki, 2015). Cet espace d'agriculture offre un environnement hautement contrôlé et

étanche afin d'obtenir une grande productivité et efficacité au niveau de l'utilisation des ressources (eau, CO₂ et emprunte au sol). Pour y parvenir, les différentes conditions environnementales intérieures sont stables et contrôlées par un système CVCA ainsi que d'autres systèmes, tel qu'un système d'enrichissement en CO₂. Inversement, dans une serre, les conditions environnementales intérieures varient beaucoup puisque l'air extérieur est souvent utilisé pour compenser l'impact des gains solaires. Cette approche limite le maintien de la concentration en CO₂ dans une serre qui ne peut donc pas excéder celle de l'extérieur. Cette concentration moins optimale en CO₂ est un des facteurs limitant la croissance des plantes. L'utilisation d'air extérieur apporte également des risques de propagation de maladies et d'insertion de pestes (Kozai et al., 2015). Par contre, la culture étagée est limitée aux plants de moins de 30 cm, comme les salades, herbes et semis. De plus, la consommation électrique d'un PFAL est principalement causée par l'utilisation d'un éclairage 100% artificiel ce qui entraîne généralement des émissions de gaz à effet de serre, selon la localisation du bâtiment (Benis, Reinhart, & Ferrão, 2017). Malgré cet inconvénient, certaines localisations, surtout celles avec un climat extrême et où les ressources sont plus rares, seraient les plus adaptés à l'implantation de PFAL que celle de serres de haute efficacité (Graamans, Baeza, van den Dobbelsteen, Tsafaras, & Stanghellini, 2018).

1.1.2 Espaces d'agriculture intégrée au bâtiment (eAIB)

L'agriculture intégrée à un bâtiment consiste à utiliser les méthodes de haute technologie développées en serres pour effectuer de l'agriculture au toit ou à l'intérieur d'un bâtiment (Puri & Caplow, 2009). Ces méthodes permettent d'améliorer l'utilisation des ressources et la productivité agricole.

La forme la plus répandue d'espace d'agriculture intégrée au bâtiment est la serre au toit. Une serre placée sur un toit permet d'améliorer son ensoleillement en milieu urbain, mais également de récupérer les pertes de chaleur par la toiture du bâtiment en hiver. Grâce à cet échange thermique, une serre au toit en climat méditerranéen ne nécessite aucun chauffage, elle peut néanmoins engendrer une surchauffe du dernier étage du bâtiment (Gomes, Benis, Silva, &

Vicente, 2016). D'autres échanges entre la serre et le bâtiment ont également été considérés, comme la récupération de l'air de retour des espaces occupés qui est riche en CO₂ et de l'eau de pluie de récoltée (Nadal et al., 2017).

D'autres types d'espace d'agriculture intégrée au bâtiment situé à l'intérieur avec lumière naturelle ont également été évoqués. D'abord, Adams et Caplow (2012) ont breveté un système de serre intégrée verticale (*vertically integrated greenhouse*), il s'agit d'un système vertical hydroponique sur rail. Celui-ci peut être installé près des murs rideaux d'un espace qui n'a pas nécessairement une vocation agricole, comme des bureaux ou un atrium par exemple. Ensuite, un concept de serre intégrée au dernier étage d'un bâtiment avec fenêtres et puits de lumière (Benis et al., 2017) a été modélisé et comparé à d'autres espaces d'agriculture. Bien que ce concept se soit montré un peu moins efficace qu'une serre au toit, il permet néanmoins de couper de moitié l'impact environnemental lié à la chaîne de production de tomates en région méditerranéenne.

Les projets d'eAIB sont limités dans la littérature et peu d'études ont développé des approches pour évaluer l'impact des plantes et les synergies sont possibles entre ce type d'espaces d'agriculture et les autres espaces d'un bâtiment.

1.2 Interactions des plantes avec leur environnement

Afin de bien comprendre l'interaction des plantes avec leur environnement, une brève description de l'activité végétale ainsi que du comportement thermique des plantes est présenté.

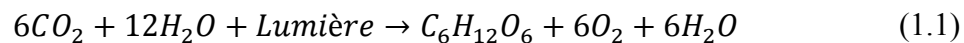
1.2.1 Activité végétale

La plante interagit avec l'environnement selon différents phénomènes biologiques : la photosynthèse, la respiration et la photorespiration. Il en résulte de façon sommaire des échanges de masse (CO₂, O₂, H₂O et nutriments) entre la plante et son environnement. Ces

phénomènes affectent également les échanges de chaleur entre la plante et son environnement tel que présenté à la section 1.2.2.

1.2.1.1 Photosynthèse et photorespiration

La croissance des plantes et la productivité agricole dépendent principalement de la photosynthèse qui s'opère dans les feuilles. Ce processus, qui a lieu de façon journalière selon la durée de la photopériode, permet aux plantes de fabriquer leur propre matière organique à partir d'énergie lumineuse, d'eau et de CO_2 . La photosynthèse est un phénomène complexe globalement décrit par l'équation (1.1).



De façon simplifiée, la plante absorbe le CO_2 contenu dans l'air par les stomates de ses feuilles. Les stomates sont de petits orifices situés à la surface des feuilles permettant les échanges gazeux entre la plante et l'air dont l'ouverture induit une résistance aux échanges gazeux qui est également appelée résistance stomatique. Cette absorption du CO_2 diminue lorsque l'ouverture des stomates est réduite par une ou plusieurs conditions (Kozai et al., 2015) :

- faible luminosité;
- apport en eau par les racines insuffisant;
- perte élevée en eau par transpiration;
- concentration en CO_2 élevée.

Grâce au CO_2 et à l'eau captée par les racines, il y a fixation du carbone, un procédé biochimique selon lequel l'énergie lumineuse, convertit en énergie chimique, produit les glucides nécessaires au développement de la plante. Principalement distribuée au sein de la plante, une partie de ces glucides est stockée dans les feuilles pour répondre aux besoins de la plante lorsque la photosynthèse n'a pas lieu. Lors de la production de glucides, deux sous-produits qui améliorent la qualité d'air sont transmis à l'environnement par les stomates : l'oxygène et la vapeur d'eau.

Il existe également un procédé inverse à la photosynthèse qui s'effectue simultanément et qui en diminue l'efficacité, il s'agit de la photorespiration. Tout comme la respiration, ce procédé consomme du O_2 et produit du CO_2 .

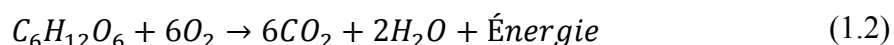
Le taux d'opération du phénomène de photorespiration sera plus important sous certaines conditions (Kozai et al., 2015) :

- luminosité élevée;
- température élevée;
- faible humidité;
- faible concentration en CO_2 .

Lors de ces conditions extrêmes, il a été démontré que la photorespiration permet à la plante de prévenir une perte d'eau par transpiration trop importante (Takahashi et al., 2011). Toutefois, la photorespiration peut être minimisée en augmentant la teneur en CO_2 (Ainsworth & Rogers, 2007).

1.2.1.2 Respiration

La respiration est un procédé inverse à la photosynthèse et moins dominant tout en étant essentielle au développement d'une plante (Noguchi & Yoshida, 2008). Ce processus a lieu de façon journalière lorsqu'il n'y a pas d'éclairage (naturel ou artificiel) selon la durée de la période obscure. Lors de la respiration, la plante absorbe l'oxygène, transforme les glucides provenant de la photosynthèse en énergie utilisable et rejette du CO_2 et de la vapeur d'eau. Le phénomène de la respiration peut également être résumé tel que présenté dans l'équation (1.2).



L'énergie chimique créée est utilisée à diverses fins et en différentes proportions selon l'âge de la plante : croissance, maintenance et absorption des nutriments par les racines.

1.2.1.3 Transpiration

La transpiration s'effectue principalement par les stomates lorsqu'elles s'ouvrent pendant la photosynthèse, mais également pendant la respiration. La diffusion de la vapeur d'eau depuis la plante vers l'air ambiant est alors induite par la différence de pression de vapeur qui existe entre les deux. La pression de vapeur dans la feuille estimée égale à la saturation de vapeur à la température de la feuille et la pression de vapeur de l'air dépend du taux d'humidité. Le taux de transpiration peut être évalué selon la différence de pression de vapeur, la résistance stomatique et la résistance de la couche limite tel que présentée à l'équation (1.3) (Kozai et al., 2015).

$$E = \frac{V_{in} - V_{out}}{R_s + R_b} \quad (1.3)$$

E : Taux de transpiration par les feuilles ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

V_{in} : Concentration de vapeur d'eau dans les stomates ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

V_{out} : Concentration de vapeur d'eau dans l'air ambiant ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

R_s : Résistance stomatique ;

R_a : Résistance de la couche limite ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$).

La transpiration est centrale dans le comportement de la plante, car elle permet à la plante de non seulement effectuer la photosynthèse et de respirer, mais également de transporter les nutriments et l'eau des racines jusqu'au bout des feuilles (Brechtner, Both, & Staff, 1996) ainsi que de réguler sa température interne.

1.2.2 Comportement thermique des plantes

Il existe un échange de chaleur entre la plante et l'environnement. Celui-ci est caractérisé par un bilan d'énergie composé de différents procédés de transfert de chaleur tel que présenté à la Figure 1.3 et à l'équation (1.4).

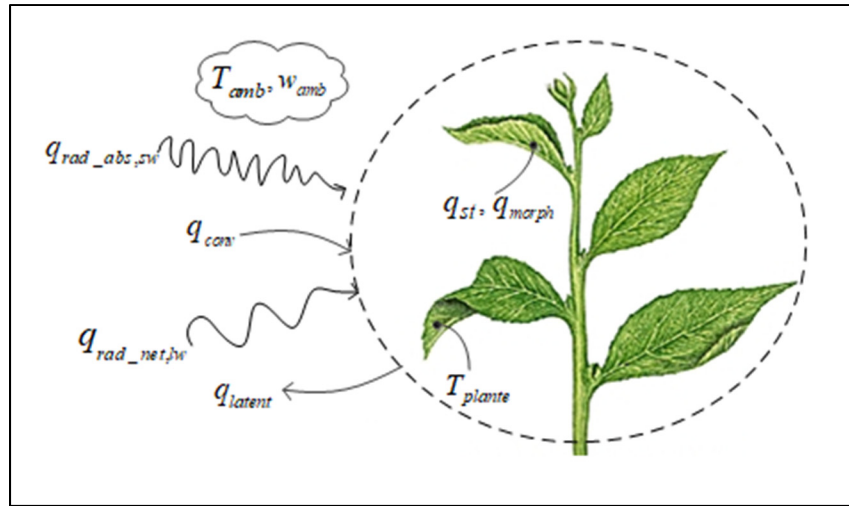


Figure 1.3 Bilan d'énergie de la plante

$$q_{rad_abs,sw} + q_{rad,lw} + q_{conv} - q_{latent} + q_{st} + q_{morph} = 0 \quad (1.4)$$

Les flux d'énergie entrants sont une portion de l'énergie radiative de courte longueur d'onde qui est émise par le soleil et/ou des lampes ($q_{rad_abs,sw}$), l'énergie radiative nette de basse longueur échangée entre la plante et son environnement (ciel et/ou murs et/ou lampes) ($q_{rad,lw}$) et l'énergie convective échangée avec l'air ambiant, soit l'effet de refroidissement des plantes.

L'énergie radiative de courte longueur d'onde est définie selon l'équation (1.5) où une portion du rayonnement photosynthétique actif (RPA) transmis par les fenêtres et/ou émis par l'éclairage artificiel ($I_{éclairage}$) est absorbée par les plantes. Cette portion dépend de paramètres spécifiques au type de plantes, soit la couverture par les feuilles de la superficie cultivée (CAC) (Tei, Scaife, & Aikman, 1996) et le coefficient de réflexion (ρ_r).

$$q_{rad_abs,sw} = (1 - \rho_r) \cdot CAC \cdot I_{éclairage} \quad (1.5)$$

Les flux d'énergie entrants sont distribués en différents flux d'énergie thermique dont principalement un rejet de chaleur latente vers l'air ambiant par transpiration (q_{latent}). Le reste

de l'énergie est stocké dans les feuilles, tiges et fruits (q_{st}) et utilisé pour le développement de la plante (q_{morp}).

Afin d'assurer la croissance des plantes, certaines conditions environnementales intérieures doivent être respectées (section 1.3). Celles-ci sont maintenues dans un eAIB à l'aide de différents systèmes CVCA (section 1.4) ainsi que d'autres systèmes (section 1.5).

1.3 Conditions environnementales intérieures

Les systèmes CVCA et autres systèmes d'un eAIB maintiennent des conditions environnementales intérieures favorisant la croissance des plantes et doivent assurer (ASHRAE, 2011; Kozai et al., 2015):

- Un apport en lumière suffisant et adéquat ;
- Une température de l'air adéquate et uniforme ;
- Une humidité de l'air adéquate ;
- Un apport en CO₂ suffisant.

Lors de leur croissance, les plantes interagissent à leur tour avec l'environnement (voir section 1.2). Pour chacune de ces conditions différentes caractéristiques doivent être respectées.

1.3.1 Lumière

Les plantes n'utilisent qu'une partie du spectre lumineux pour la photosynthèse, soit les radiations entre 400 et 700 nm, appelées le rayonnement photosynthétique actif (RPA). Le RPA compose le rayonnement solaire à 43% et correspond environ à la lumière visible. Dans un espace d'agriculture, ces radiations sont émises par le soleil et/ou des lampes pour la durée de la photopériode selon l'intensité de l'éclairage (c.-à-d. l'énergie lumineuse photonique émise par unité de temps), ce qui est spécifique au type de plante cultivée (Dorais, 2003). Cette intensité peut être déterminée en diverses unités ($W \cdot m^{-2}$, $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, lux) pour

l'éclairage naturel (équation (1.6)) ou artificiel (équation (1.7)) à partir des conversions suivantes (Dorais, 2003) :

$$1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} = 4,6 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 280 \text{ lux} \quad (1.6)$$

$$1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} = 5 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1} = 425 \text{ lux} \quad (1.7)$$

1.3.2 Température ambiante

La croissance des plantes dépend grandement de la température ambiante. Il existe pour chaque plante un intervalle de température ambiante selon lequel les enzymes des plantes seront les plus performantes (Brechtner et al., 1996). Ces intervalles présentés au Tableau 1.1 varient selon le niveau de besoin thermique (bas, moyen, élevé) de la plante cultivée et de façon cyclique (photopériode, période obscure) (Castilla, 2013). Il est préférable de maintenir la température ambiante plus basse la nuit que le jour afin de limiter les pertes par respiration des plantes (Hanan, 1997).

Tableau 1.1 Température ambiante optimale selon le type de plante cultivée

Besoin thermique	Plantes	Température ambiante, °C	
		Photopériode	Période obscure
Bas	Laitue, fraise, endive	10-25	7-10
Moyen	Tomate, haricot, poivrons, aubergine, courgette	16-30	13-18
Élevé	Melon, melon d'eau, concombre	20-35	18-24

À l'extérieur de ces intervalles, la croissance des plantes n'est pas optimale et les récoltes sont affectées tant au niveau de la quantité que de la qualité (Castilla, 2013). Il a également été montré que les plantes peuvent subir une baisse de température de 5°C sous leur plage de confort thermique à condition que leurs racines soient maintenues au chaud (Garzoli, 1989).

1.3.3 Humidité

L'humidité relative à l'intérieur de l'espace d'agriculture a une influence directe sur le taux de transpiration de plante, il donc est important qu'elle ne soit ni trop élevée ni trop basse (section 1.2.1.3). D'autre part, une humidité relative élevée peut apporter aux plantes des problèmes de champignons et moisissures (Brechtner et al., 1996) et/ou mettre en péril l'intégrité de l'enveloppe dépendamment des matériaux qui la composent. Une humidité relative entre 70% et 80% est souvent considérée comme optimale (Hézar, Swathy, Poughon, Fontaine, & Dussap, 2012). Sous une humidité relative plus basse que 70%, les plantes tireront plus d'eau par leurs racines afin de minimiser le flétrissement dû à l'augmentation de la différence de pression de vapeur entre la plante et l'air ambiant (Kozai et al., 2015).

1.3.4 Concentration en CO₂

Dans un espace d'agriculture, il est préférable de maintenir la concentration de CO₂ égale ou supérieure à celle des conditions extérieures (environ 400 ppm) afin de favoriser le processus de photosynthèse lors de la photopériode. Pour améliorer de productivité, la concentration en CO₂ est généralement maintenue par un système d'enrichissement au CO₂ à 1000 ppm (Kozai et al., 2015) dans un espace d'agriculture contrôlée afin de favoriser la photosynthèse. Cela peut par exemple se traduire en un gain de production de 35% de têtes de laitues (Kozai et al., 2015). Une concentration trop élevée en CO₂ aura comme effet d'augmenter la résistance stomatique de la plante, ce qui diminue les pertes d'eau par transpiration (Ainsworth & Rogers, 2007).

1.4 Systèmes CVCA

La conception des systèmes CVCA d'un espace d'agriculture intégrée à un bâtiment est effectuée à partir des méthodes utilisées en science du bâtiment (ASHRAE, 2007a), mais doit répondre aux besoins spécifiques de ce type d'espace. En effet, un système traditionnel maintien généralement un point de consigne en température de 21°C en température et en humidité relative de 30%. Alors que le système d'un eAIB maintien un point de consigne en

température qui dépend du type de plantes cultivées et un point de consigne en humidité relative élevée, soit entre 70% et 80%. De plus, les systèmes conçus doivent idéalement être en mesure de favoriser la productivité tout en minimisant la consommation énergétique. Cette section décrit brièvement les éléments principaux qui composent les systèmes CVCA utilisés dans un espace d'agriculture.

1.4.1 Ventilation

La ventilation forcée et naturelle peut permettre de contrôler la température et l'humidité ainsi que d'assurer un apport minimal en CO_2 en alimentant l'espace avec de l'air extérieur. Pour une serre, il est montré qu'un taux de changement d'air entre 45 h^{-1} et 60 h^{-1} permet de contrôler la température en été lorsque les gains de chaleur sont très importants (ASHRAE, 2011). En hiver, un apport en air frais est également nécessaire afin de maintenir un taux de CO_2 minimal. Pour y parvenir, ASHRAE (2011) recommande un taux de changement d'air de 10 à 15 L/s par mètre carré, ce qui correspond à $7,2 \text{ h}^{-1}$ à $10,8 \text{ h}^{-1}$ pour une serre d'une hauteur d'environ 5 m. Pour un PFAL étanche, cet apport en air extérieur est réduit au minimum, entre $0,01 \text{ h}^{-1}$ et $0,02 \text{ h}^{-1}$, afin de diminuer les risques d'introduction de pestes et de maladies ainsi que d'éviter la dilution du CO_2 . Enfin, lorsque l'espace d'agriculture est occupé (par exemple dans le cas d'une serre verticale intégrée (voir section 1.1.2)), les besoins en air frais pourraient être réduits puisque les plantes améliorent la qualité d'air lors de la photosynthèse (voir section 1.2.1) (Raji, Tenpierik, & van den Dobbelsteen, 2015).

La ventilation forcée permet également d'assurer une circulation d'air au sein l'espace par l'utilisation de ventilateurs, ce qui est essentiel dans un espace d'agriculture pour différentes raisons :

- Lorsque maintenu à $0,5 \text{ m/s}$ (ASHRAE, 2011), l'écoulement d'air sur les plantes permet de maximiser les échanges gazeux (vapeur d'eau, CO_2 , O_2) et les échanges de chaleur.
- La circulation d'air permet de minimiser la condensation sur les feuilles et dans l'espace d'agriculture, ce qui prévient la prolifération de bactéries et moisissure.

- La circulation permet également d'uniformiser la température, l'humidité et la concentration en CO₂ selon l'axe vertical et horizontal.

Par contre, il n'est pas conseillé de dépasser une vitesse d'alimentation de l'air de 1 m/s, car cela réduit la croissance des plantes (Kozai et al., 2015) qui doivent déployer de l'énergie pour résister à cette force. La ventilation forcée permet également de maintenir une pression positive ou négative dans l'espace. Dans une serre fermée, il est préférable d'induire une pression positive afin de protéger les plantes des microbes et des parasites provenant de l'extérieur (Despommier, 2013).

1.4.2 Chauffage

Le chauffage permet de maintenir le point de consigne en température bulbe sec au sein de l'espace d'agriculture. Pour une serre, le système de chauffage le plus commun est le chauffage à l'eau chaude ou à la vapeur. Le fluide caloporteur, souvent chauffé à l'aide d'énergies fossiles, se déplace dans un réseau de tuyauterie placé à la hauteur des plantes et transmet la chaleur par convection et par radiation. Ce mode de chauffage induit une grande stratification thermique (ASHRAE, 2015). D'autre part, afin de diminuer les coûts énergétiques et l'émission de polluants, dont les gaz à effet de serre, l'intégration de systèmes de chauffage alimenté par une source d'énergie renouvelable (solaire, géothermie, aérothermie, biomasse) a été étudié à partir de la modélisation et/ou de serres expérimentales.

Un exemple intéressant pour le chauffage d'une serre consiste à utiliser un collecteur solaire passif et sélectif qui absorbe l'énergie solaire qui n'est pas utile à la photosynthèse, soit les ondes du rayonnement solaire n'étant pas inclut dans le RPA. Il s'agit d'un concept original étudié par Tadili et Dahman (1997) et illustré à la Figure 1.4. Ce système est toutefois complexe et requière des installations importantes.

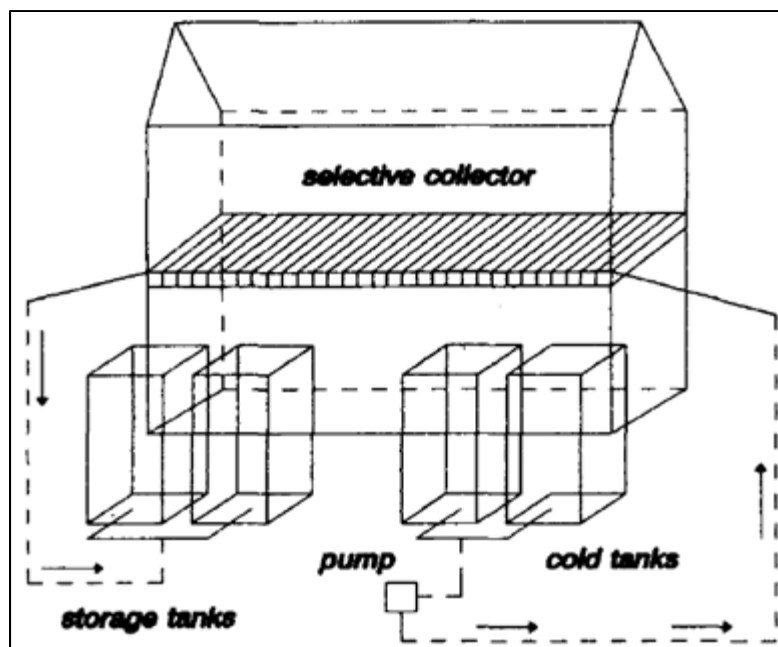


Figure 1.4 Serre expérimentale avec capteur sélectif tirée de Tadili et Dahman (1997)

Un système davantage étudié est l'utilisation d'une pompe à chaleur (ou une thermopompe) afin de convertir la chaleur provenant d'un milieu à basse température en une chaleur à plus haute température. Pour ce type de système, le rendement énergétique et le retour sur l'investissement varient énormément selon le climat et le coût de l'électricité. Par exemple, Choi (2004) a évalué différents modes d'utilisation d'une pompe à chaleur géothermique implanté en Turquie pour chauffer une serre la nuit. L'étude conclut que lorsque le système géothermique opère proportionnellement selon la charge de chauffage, la température dans la serre est plus uniforme. Ce mode de fonctionnement a toutefois un impact au niveau des performances énergétiques puisque la pompe à chaleur fonctionne fréquemment à charge partielle, limitant les économies d'énergie possibles. Une analyse économique complète, qui permettrait de proposer un système optimisé afin de maximiser les profits provenant de la production maraîchère tout en minimisant les coûts d'énergie, n'a toutefois pas été réalisée. D'autre part, Aye, Fuller, et Canal (2010) se sont intéressée à un système aérothermique couplé à une chaudière au gaz et un réservoir de stockage implanté en Australie. Leur étude a permis de conclure que le système est rentable économiquement, mais n'amène aucune réduction en gaz à effet de serre en Australie. Ils avancent également que le système serait plus efficace si

l'énergie était puisée dans le sol plutôt que dans l'air. Un autre élément intéressant de l'étude est que le CO₂ généré par l'utilisation de la chaudière aux combustibles fossiles lors du chauffage de la serre est utilisé pour enrichir l'air en CO₂.

Des systèmes plus standards, tel qu'un aérotherme au gaz, sont aussi souvent utilisés pour chauffer les serres. Le choix du système de chauffage est souvent influencé par le climat et les contraintes économiques du projet.

1.4.3 Humidification

Lorsque nécessaire, l'humidification de l'air est effectuée par un système d'humidification adiabatique ou à vapeur (Lazzarin & Nalini, 2004). En climat chaud et sec, l'humidification adiabatique est privilégiée, car elle refroidit l'air qui est ensuite humidifié. Alors qu'un humidificateur à vapeur va légèrement réchauffer l'air, ce qui est plus adapté à un climat froid et sec.

1.4.4 Refroidissement

Le refroidissement est généralement assuré par la ventilation naturelle et/ou forcée dans une serre. Or, il a été montré que la ventilation n'est pas toujours suffisante pour maintenir le point de consigne en température lors des journées chaudes et ensoleillées d'été. Dans ces cas-là, l'utilisation d'un système de refroidissement est une option qui peut être envisagée (Baille, 1997). Dans le cas d'un espace d'agriculture avec éclairage artificiel, les gains de chaleur provenant des lampes (dus à leur inefficacité) génèrent une importante demande en refroidissement. Pour répondre à ces besoins en refroidissement, deux systèmes de refroidissement sont généralement utilisés :

- Le refroidissement par évaporation, qui permet d'enrichir l'air en eau et d'abaisser la température intérieure (Sethi et al., 2013).

- Le refroidissement de l'air à l'aide d'un serpentin qui permet de refroidir l'air tout en le déshumidifiant (Lazzarin & Nalini, 2004) tel que présenté à la Figure 1.5 sur un abaque psychométrique.

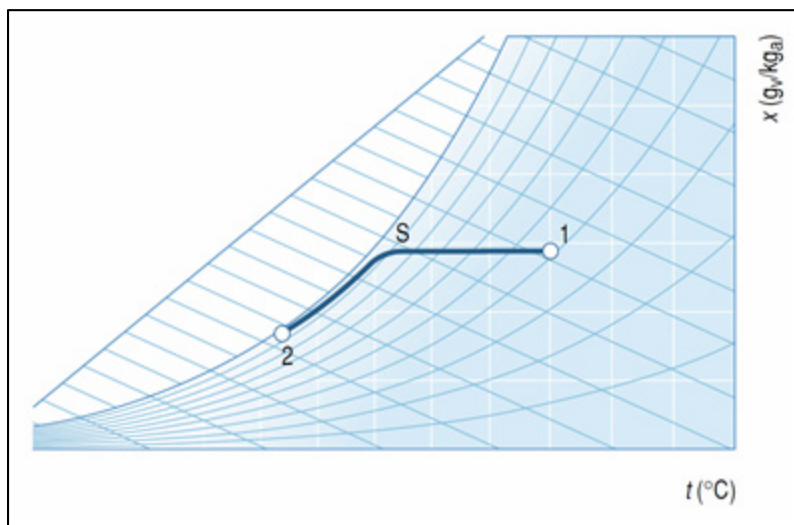


Figure 1.5 Refroidissement de l'air au-dessous du point de rosée avec déshumidification tirée de Lazzarin et Nalini (2004)

Les besoins en refroidissement d'un espace d'agriculture peuvent néanmoins être atténués par la présence de plantes pour différentes raisons :

- Les plantes ont un effet de refroidissement sensible sur leur environnement lorsqu'elles transpirent (section 1.2.1.3).
- Les plantes réduisent les gains solaires, car une partie des rayons solaires transmis par les fenêtres sont absorbés par les plantes et majoritairement transformés en énergie latente (Lazzarin, Castellotti, & Busato, 2005). À titre d'exemple, il est possible d'approximer que lorsque la serre est couverte de plante mature, la moitié des gains solaires sont convertis en énergie latente par les plantes par la transpiration, un quart à un tiers est convertit en énergie sensible et le reste étant réfléchi ou absorbé par les plantes ASHRAE (2011).

1.4.5 Déshumidification

Un système de déshumidification autonome et indépendant des autres systèmes CVCA est généralement installé dans un espace d'agriculture pour déshumidifier. Ce système est utilisé lors de la période obscure, lorsque les besoins en refroidissement sont moins élevés et que les plantes respirent et transpirent (DCA, 2018). Le système refroidit et assèche l'air par la condensation de la vapeur d'eau puis l'air est réchauffé au point de consigne en température.

1.5 Autres systèmes

D'autres systèmes contribuent au maintien des conditions environnementales intérieures et certain modulent les besoins en chauffage et refroidissement.

1.5.1 Système d'ombrage

Parmi les systèmes d'ombrage, les rideaux sont souvent utilisés et peuvent contribuer au maintien des conditions intérieures dans un espace d'agriculture fenestré. Ceux-ci peuvent être utilisés pour remplir l'une ou l'autre de ces fonctions :

- Lorsque les rideaux sont opaques aux rayons solaires, ils permettent de diminuer les gains solaires lorsqu'ils sont trop élevés. Cependant, cela diminue l'apport en énergie lumineuse fournie par l'éclairage naturel qui est nécessaire à la photosynthèse ;
- Lorsque les rideaux sont opaques aux rayons infrarouges, ils permettent de diminuer les pertes de chaleur de l'espace d'agriculture par radiation infrarouges. Cependant, dépendamment du climat, cela peut engendrer une accumulation non désirée de neige sur l'enveloppe d'une serre (ASHRAE, 2011) ou un puit de lumière.

1.5.2 Système de stockage d'énergie

Dans une serre, le stockage d'énergie est une mesure répandue, car il permet de récupérer l'excès d'énergie solaire capté par la serre lors d'une journée ensoleillée afin de la chauffer la

nuit ou lors des journées nuageuses. Cela fournit aux plantes un environnement plus stable, ce qui se traduit en une plus grande productivité (Kıyan, Bingöl, Melikoğlu, & Albostan, 2013). Plusieurs méthodes de stockage existent, l'une d'elles consiste à emmagasiner l'énergie sensible excédentaire dans un lit de roche (Sethi, 2013). Il s'agit d'une méthode économique et facile à mettre en place. D'autre part, Ntinis, Fragos, et Nikita-Martzopoulou (2014) ont mis au point un système de stockage d'énergie plus complexe composé de tubes d'eau. Il s'agit du système conçu pour des serres en culture hydroponique présenté à la Figure 1.6.

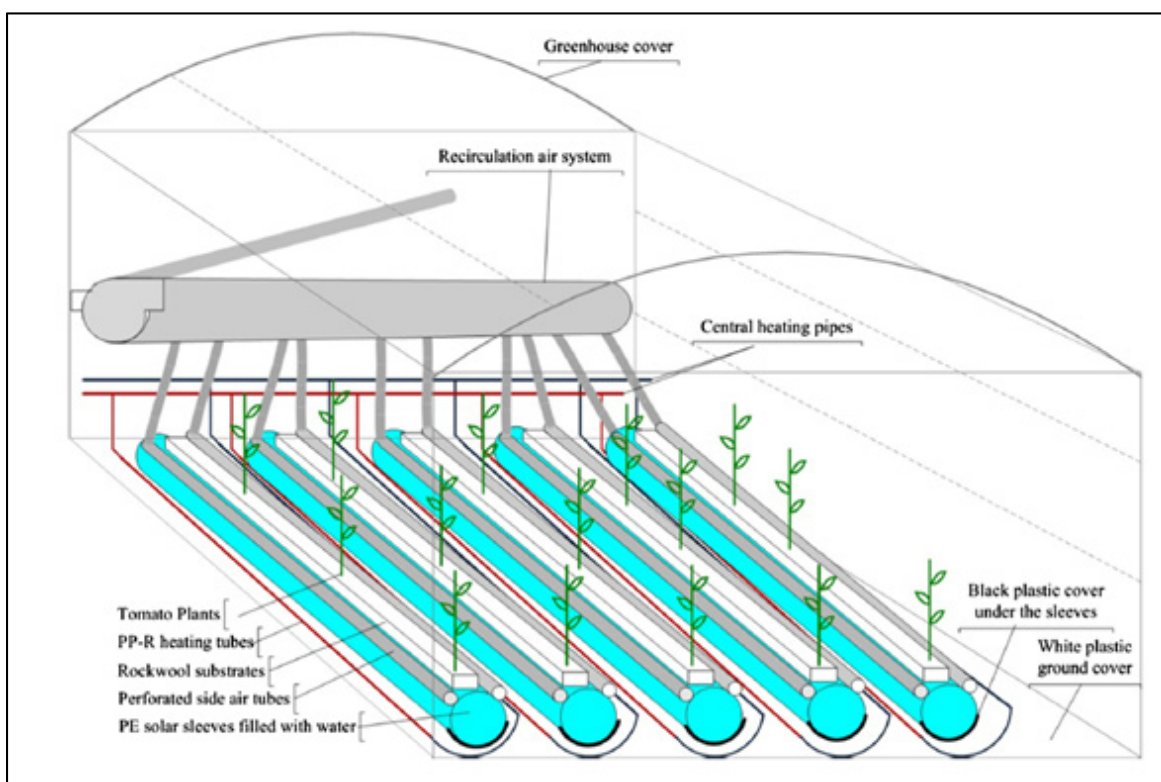


Figure 1.6 Système solaire hybride d'économie d'énergie tirée de Ntinis et al. (2014)

Le système a également la particularité de faire circuler l'air chaud qui s'accumule au haut de la serre vers la végétation en bas de la serre à l'aide d'un système de ventilation composé de tubes de plastiques.

1.5.3 Système d'enrichissement au CO₂

L'enrichissement de l'air en CO₂ à environ 1000 ppm est une méthode qui permet de maximiser la photosynthèse (voir section 1.2.1.1). Un système d'enrichissement d'air au CO₂ est généralement nécessaire lorsque l'espace d'agriculture est étanche ou peu ventilé (ASHRAE, 2011) sans quoi le taux de CO₂ devient extrêmement bas dû à la photosynthèse des plantes. Inversement, il n'est pas économiquement viable d'implanter ce système d'enrichissement au CO₂ si le nombre de changements d'air à l'heure dus à la ventilation et/ou l'infiltration est trop élevée. En effet, dans cette situation, la quantité de CO₂ gaspillée par la ventilation et l'infiltration est supérieure à celle absorbée par les plantes. Or, Ohyama et Kozai (1998) ont montré que cela est le cas à partir de seulement 0,1 CAH. La concentration tendra alors à se limiter à celle de l'air extérieur et le CO₂ injecté est gaspillé (Kozai et al., 2015). Enfin, avec une circulation d'air (Section 1.4.1) qui induit une vitesse d'écoulement de 0,5 m/s, il est possible de diminuer le taux d'enrichissement d'air en CO₂ par rapport à un espace où aucun écoulement d'air ne serait induit mécaniquement (ASHRAE, 2011).

1.5.4 Système d'éclairage artificiel

Pour s'assurer que les plantes reçoivent suffisamment d'énergie lumineuse durant la photopériode, l'éclairage artificiel peut être utilisé pour compléter l'apport en éclairage naturel ou encore comme seule et unique source d'énergie lumineuse. Dans le passé, l'utilisation de lampes au sodium, lampes aux halogénures métalliques et fluorescents a été privilégiée. Or avec le développement de la technologie, les lumières de type DEL sont de plus en plus utilisées. En effet, dans certains types d'eAIB ou dans un PFAL, les plantes sont superposées à l'intérieur d'étagères illuminées par un éclairage de type DEL. Ce type d'éclairage permet de placer les lampes près des plantes sans les brûler, car les pertes thermiques radiatives des lampes DEL sont négligeables (Ahn, Jang, Leigh, Yoo, & Jeong, 2014). L'éclairage artificiel fonctionne généralement sur un horaire déterminé par la photopériode selon le type de plantes cultivé.

1.6 Modélisation

Afin d'évaluer les charges d'un eAIB, la modélisation de l'espace d'agriculture peut être effectuée. En effet, la modélisation est l'un des outils permettant de déterminer les charges de chauffage et de refroidissement, mais également d'évaluer le comportement énergétique sur une année. La modélisation permet également d'évaluer les performances énergétiques de systèmes CVCA lors du processus de conception.

Lors de la conception d'un espace d'agriculture, généralement une serre, l'interaction de la plante avec l'environnement de la serre est souvent négligée lors de la modélisation (Sethi et al., 2013) puisqu'il a été précédemment établi que l'impact thermique des plantes sur son environnement peut être négligeable. Cependant, il a récemment été montré que l'impact des plantes sur la température et l'humidité de l'air dans un bâtiment peut être significatif (Ward & Choudhary, 2014) et qu'il n'est pas conseillé de négliger l'effet des plantes lors de la modélisation d'un espace d'agriculture (Sethi et al., 2013). Il est donc récent que des chercheurs (Benis et al., 2017; Graamans, van den Dobbelsteen, Meinen, & Stanghellini, 2017; Kokogiannakis & Cooper, 2015; Ward, Choudhary, Cundy, Johnson, & McRobie, 2015) développent des modèles de plantes destinés à être couplés avec un logiciel de modélisation de bâtiment. Ces modèles ont pour objectif de prédire l'impact de la plante sur son environnement (température, humidité et concentration en CO₂) alors que certains seulement ont en plus pour objectif de prédire la croissance des plantes et la productivité agricole.

Différentes approches sont possibles pour la modélisation d'espaces d'agriculture. Plusieurs études traitent de la modélisation des serres afin de minimiser leur empreinte environnementale. En effet, bien que les serres captent plus d'énergie solaire convertie en chaleur que ce qui est nécessaire au chauffage de celles-ci (Bastien, 2015), le décalage entre l'absorption et l'utilisation de la chaleur ne permet pas d'utiliser totalement cette source d'énergie renouvelable. Pour combler les besoins de chauffage, les énergies fossiles sont souvent utilisées, ce qui les rend extrêmement énergivores et polluantes. En effet, plus de 30% des dépenses d'une serre sont dues au chauffage (Tadili & Dahman, 1997). L'approche de

modélisation peut être plus ou moins complexes dépendamment des analyses à compléter. Une approche statique permet d'obtenir des résultats rapidement. Toutefois, cette méthode n'est pas retenue, car elle est d'une précision insuffisante puisque les variables transitoires du bilan énergétique, soient le stockage thermique et les variables climatiques (gains solaires, température de l'air et du sol, vent), sont négligées. L'approche dynamique est donc retenue, car elle permet de prédire avec une meilleure précision les besoins énergétiques et le microclimat dans la serre. Une bonne conception minimise les coûts de chauffage tout en maintenant des conditions environnementales intérieures favorisant la croissance des plantes. Puisqu'il s'agit d'un problème complexe incluant de nombreuses variables, l'analyse énergétique est un outil essentiel.

Le modèle mathématique le plus couramment utilisé se résume à la résolution de bilans d'énergie et de masse (H_2O , O_2 et CO_2) sur la serre pour chaque heure d'une année typique. En général, la serre est représentée comme étant un volume de contrôle composé de différentes couches verticales ou horizontales. À l'aide d'une large étude comparant de nombreux modèles développés, Sethi et al. (2013) ont conclu que le système est généralement séparé en cinq couches isothermes horizontales : le milieu de culture, le sol, la végétation, l'air ambiant et l'enveloppe. Cependant, Ha, Lee, Kwon, et Hong (2015) a plutôt choisi une configuration verticale. En effet, à l'aide de données expérimentales, les trois configurations présentées à la Figure 1.7 ont été modélisées afin de déterminer quel était le modèle le plus précis. La modélisation par couches horizontales s'est avérée moins juste que celle par couches verticales, cela est dû, selon Ha et al. (2015), à une moins bonne représentation de la distribution selon l'axe vertical de la chaleur provenant du système de stockage d'énergie placé près du sol.

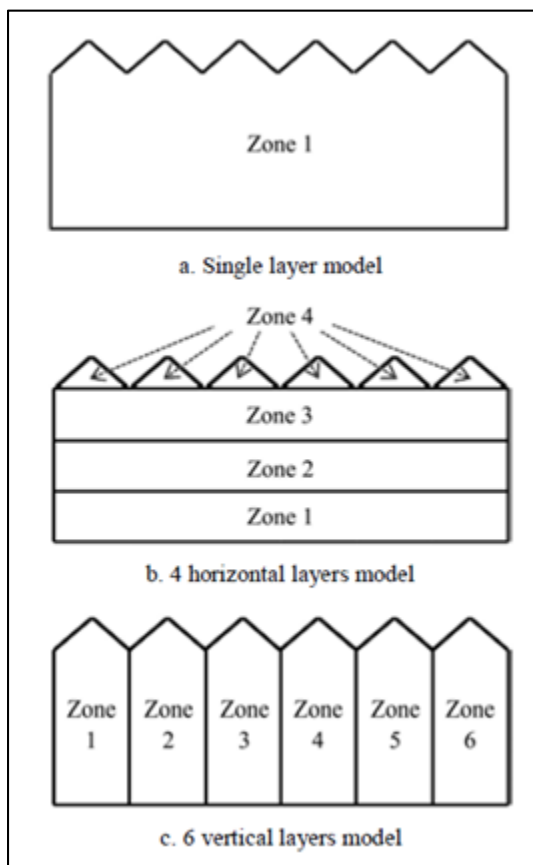


Figure 1.7 Différents volumes de contrôle étudiés tirée de Ha et al. (2015)

Les bilans d'énergie effectués incluent les échanges de chaleur par conduction et radiation avec l'extérieur, l'infiltration d'air, la ventilation, les gains solaires, les gains internes ainsi que l'énergie stockée. Les gains internes proviennent majoritairement de l'éclairage qui est beaucoup plus important que dans les autres types de bâtiments. Les bilans de masse en eau incluent les échanges dus à l'infiltration et la ventilation ainsi que la vapeur d'eau ajoutée ou retirée à l'air par les équipements d'humidification et de déshumidification. Cependant, même si le gain en vapeur d'eau dû par la transpiration des plantes est important, de nombreuses études le négligent. Également, la condensation aux murs et aux planchers n'est pas tenue en compte (Sethi et al., 2013). Les bilans de masse du CO₂ sont également effectués afin d'assurer une productivité au sein de la serre. Pour ce faire, des relations empiriques existent pour effectuer le bilan ainsi que d'évaluer les besoins en CO₂ des plantes (Sethi et al., 2013).

Les modèles basés sur les bilans d'énergie et de masse permettent de prédire le microclimat de la serre. Cependant, d'autres modèles peuvent être utilisés si cette prédiction n'est pas désirée. En effet, dans une étude portant sur les performances d'un système de chauffage avec une thermopompe, Aye et al. (2010) ont simplement utilisé des équations permettant d'estimer les charges horaires qui ont été développée par Garzoli (1985).

Les modèles de serre sont souvent développés à l'aide des logiciels MATLAB/Simulink (Kıyan et al., 2013; Vanthoor, Stanghellini, van Henten, & de Visser, 2011) ou TRNSYS (Aye et al., 2010; Ha et al., 2015; Ward et al., 2015). Ces logiciels proposent des banques de composantes déjà programmées et permettent d'effectuer des analyses énergétiques transitoires selon une structure modulaire. Pour concevoir le système énergétique de la serre, il s'agit de le séparer en sous-systèmes et d'assembler les modules correspondants. De plus, un logiciel comme TRNSYS est très flexible, car il permet au professionnel de créer ses propres composantes.

D'autres chercheurs ont plutôt programmé manuellement le modèle de la serre ainsi que sa résolution. C'est ce que Ntinis et al. (2014) ont fait en créant un code dans le langage de programmation FORTRAN. Gauthier (1993) a également développé un logiciel de simulation. Le logiciel propose deux fonctions distinctes : il permet d'abord de modéliser une serre qui interagit avec des instruments de mesure fictifs et il agit également comme programme de contrôle pour une serre expérimentale.

En somme, de nombreux modèles ont été créés au sein de la communauté scientifique puisque chaque modèle est spécifique au climat et aux facteurs économiques de l'emplacement où la serre est implantée. C'est d'ailleurs pour répondre à ce problème de dispersion des efforts que Vanthoor, Stanghellini, et al. (2011) propose un modèle de serre validé qui s'adapte à différents types de serre et climats.

Pour ce qui est d'intégrer un espace d'agriculture à un modèle de bâtiment multizone, TRNSYS (Ward et al., 2015) et ESP-r (Kokogiannakis & Cooper, 2015) sont les logiciels qui ont été retenus jusqu'à ce jour.

1.7 Perspectives

Peu d'études se sont attardées à la modélisation d'eAIB en vue d'évaluer le comportement énergétique de ceux-ci (p. ex. Ward et al. (2015), Kokogiannakis et Cooper (2015)). Par contre, il existe plusieurs approches pour évaluer la performance de serres indépendantes. Ces approches permettent une compréhension plus approfondie des interactions possibles au sein d'une installation d'agriculture urbaine protégée et supportent le développement de l'approche pour estimer l'impact des plantes sur les charges de l'eAIB.

CHAPITRE 2

DÉMARCHE DE RECHERCHE ET CONTRIBUTION ATTENDUE

2.1 Démarche de recherche

Afin de développer une approche d'estimation des charges d'un espace d'agriculture intégrée au bâtiment qui inclut le flux de chaleur sensible et latente émis par les plantes, deux études paramétriques subséquentes sont effectuées. Les deux études comportent un modèle de bâtiment créé au sein du logiciel de simulation énergétique TRNSYS 18 (Klein et al., 2017). Ce logiciel a été choisi parmi d'autres, car il offre la possibilité de développer des systèmes CVCA complexes et de créer ses propres composantes. Ces particularités sont essentielles afin d'évaluer la productivité agricole et la performance énergétique d'eAIB lors de travaux futurs. Les deux études comportent également un modèle de plantes. Celui-ci est couplé au modèle de bâtiment afin d'inclure l'impact thermique des plantes lors de l'estimation des charges.

2.1.1 Première étude paramétrique

La première étude paramétrique consiste à déterminer l'impact des plantes, spécifiquement des plants de tomate, sur les charges d'un eAIB sous éclairage artificiel (CHAPITRE 3). Il s'agit d'une étude exploratoire basée sur une étude de cas, soit un bâtiment multi-usage à vocation alimentaire, où plusieurs paramètres sont définis de façon arbitraire. Les charges horaires sont estimées selon une étude paramétrique portant sur la densité de culture, l'intensité d'éclairage et le débit de ventilation pour une journée froide et sèche d'hiver et une journée chaude et humide d'été. Lorsqu'évalué, l'impact des plantes sur les charges permet de déterminer :

- Si le comportement thermique des plantes concorde avec la littérature ;
- Si le flux de chaleur des plantes est significatif par rapport aux charges d'un eAIB ;
- Si le modèle de plantes de cette étude convient au besoin de recherche.

2.1.2 Deuxième étude paramétrique

Une deuxième étude paramétrique consiste à déterminer l'impact des plantes sur les charges maximales d'un eAIB sous éclairage artificiel pour des conditions de conception (ASHRAE, 2007b). Cette deuxième étude paramétrique (CHAPITRE 4) s'appuie sur les résultats de la première étude paramétrique. Il s'agit d'une étude plus générale portant sur un eAIB placé au sein d'un bâtiment à bureaux. Les charges maximales de l'eAIB incluant l'impact des plantes sont estimées selon l'approche développée dans cette recherche pour la culture de laitues. Les charges maximales de l'eAIB sont d'abord estimées pour les conditions de conception puis couplées aux flux de chaleur appropriés induits par les plantes. Les charges maximales sont estimées selon une étude paramétrique portant entre autres sur la densité de culture pour différents paramètres choisis par les producteurs. Lorsqu'évalué, l'impact des plantes sur les charges maximales permet de déterminer :

- S'il y a des limites à l'approche proposée ;
- Si les paramètres choisis par les producteurs ont une influence sur les charges maximales estimées.

2.2 Contribution attendue

L'approche développée permet d'estimer les charges d'un eAIB qui incluent l'impact des plantes à l'aide du logiciel de modélisation TRNSYS. Plus globalement, l'approche développée pourra être utilisée pour dimensionner les systèmes CVCA et évaluer leurs performances dans le cadre de projets futurs. Cela permettra également d'élaborer et d'évaluer le potentiel de différentes stratégies d'échange entre les autres espaces du bâtiment et l'eAIB. D'autre part, cette recherche permet de se familiariser avec l'utilisation de deux différents modèles de plantes (tomates et laitues), les produits maraichers les plus cultivés en eAIB.

CHAPITRE 3

IMPACT DES PLANTES SUR LES CHARGES D'UN EAIB SELON DES PARAMÈTRES EXPLORATOIRES

À partir de cette étude, un article de conférence a été réalisé et présenté dans le cadre de la conférence eSIM 2018 (Talbot & Monfet, 2018).

3.1 Modélisation des flux de chaleur induits par les plantes

Lorsqu'un bâtiment dédié à l'agriculture est modélisé, l'impact des plantes sur les charges est généralement négligé par leur complexité. Dans les dernières années, différents auteurs (Benis et al., 2017; Graamans et al., 2017; Kokogiannakis & Cooper, 2015; Ward et al., 2015) ont proposé des modèles de plantes en culture hydroponique qui s'intègrent à un modèle de bâtiment. Le Tableau 3.1 présente un aperçu des différents modèles proposés.

Tableau 3.1 Comparaison des modèles de plantes

	Ward et al. (2015)	Kokogiannakis et al. (2015)	Benis et al. (2017)	Graamans et al. (2017)
Type de plantes	Tomates	Non spécifique	Tomates	Laitues
Type d'espace d'agriculture protégée	Serre autonome	Serre autonome	Serre autonome, serre au toit, serre intégrée, PFAL	PFAL
Objectif de recherche	Développer un modèle de plantes autonome et évaluer l'impact des plantes au sein d'une serre.	Développer un modèle de plantes versatile qui s'intègre à un modèle de bâtiment.	Évaluer le potentiel de réchauffement global (PRG) de différents types d'eAIB.	Valider à l'aide de données expérimentales un modèle de plantes simple en régime permanent pour différents scénarios.
Modélisation de la concentration en CO₂	✓	-	-	-
Modélisation de la croissance des plantes	✓ (Vanthoor, de Visser, Stanghellini, & van Henten, 2011)	-	✓ (Vanthoor, de Visser, et al., 2011)	- (Valeurs expérimentales)

Tous les modèles consistent à modéliser le comportement énergétique des plantes (section 1.2.2) par la résolution du bilan d'énergie selon l'équation (1.4). De plus, certains modèles permettent de prédire la croissance des plantes, la productivité agricole et la consommation de CO₂ des plantes.

Pour modéliser les flux d'énergie, différents modèles développés et validés en horticulture sont utilisés tels que détaillés dans le Tableau 3.2. Alors que tous les auteurs ont négligé l'énergie utile au développement (q_{morph}), l'énergie stockée (q_{st}) et échangée avec l'environnement par radiation infrarouge ($q_{rad,lw}$) sont négligées par certains auteurs seulement.

Tableau 3.2 Détails des flux d'énergie considérés pour les modèles de plantes développés

	Ward et al. (2015)	Kokogiannakis et al. (2015)	Benis et al. (2017)	Graamans et al. (2017)
$q_{rad\ abs.sw}$ (lumière absorbée)	$f(q_{rad\ soleil}, q_{rad\ lampes}, LAI, k_l)$ De Zwart (1996)	$f(q_{rad\ soleil}, \alpha_{pl})$	Valeur expérimentale	$f(q_{rad\ lampes}, \alpha_{pl})$
$q_{rad.lw}$ (radiative (infrarouge))	$f(T_{pl}, T_{ciel})$	-	-	-
q_{conv} (convective)	$f(T_{pl}, LAI, T_{amb}, U_{\infty})$	$f(h_{conv}, T_{vl}, T_{amb}, vpd)$	-	$f(LAI, T_{vl}, T_{amb}, r_a)$ Monteith (1965)
q_{lat} (latente)	$f(r_{st}, LAI, vpd)$ Joliet (1994)	$f(q_{rad\ soleil}, r_{st}, r_a, T_{amb})$ Peinman-Monteith model Monteith (1965)	$f(r_{st}, LAI, vpd)$ Cecilia Stanghellini (1987)	$f(q_{rad\ soleil}, r_{st}, r_a, T_{amb}, vpd)$ Peinman-Monteith model Monteith (1965)
r_{st} (résistance stomatique)	$f(vpd, q_{rad\ abs}, T_{vl}, [CO_2])$ C. Stanghellini (1996)	$f(q_{rad\ abs}, T_{amb}, vpd)$ (équation dérivée de Jarvis (1976))	$f(LAI)$ Pamungkas, Hatou, et Morimoto (2014)	$f(q_{rad\ abs})$ (équation dérivée de Wang, Lu, Tong, et Yang (2016))
r_a (résistance aérodynamique de la couche limite)	-	$f(U_{\infty})$ Thom et Oliver (1977)	$f(U_{\infty})$ Pamungkas et al. (2014)	Valeurs statiques
q_{st} (stockée)	✓	✓	-	-

Puisque les interactions des plantes avec l'air sont multifactorielles, différents niveaux de complexité peuvent être considérés. Par exemple, le modèle de Ward et al. (2015) est dynamique avec de nombreuses variables et a été utilisé pour simuler l'impact des tomates qui

croient dans une serre semi-contrôlée avec éclairage naturel et artificiel selon la température et la concentration en CO₂. La croissance des plantes est évaluée par le *Leaf Area Index* (LAI) qui est définie comme le ratio de la superficie d'un côté des feuilles sur la superficie cultivée (Watson, 1947). Inversement, le modèle de Graamans et al. (2017) est basé sur des modèles de flux énergétiques plus simples et a été validé expérimentalement en régime permanent. Le modèle a été utilisé pour explorer et quantifier le comportement énergétique des laitues pour différentes intensités d'éclairage artificiel et de températures pour la photopériode et la période obscure au sein d'un PFAL.

3.2 Approche de modélisation

Afin d'observer l'impact des plantes au sein d'un eAIB de façon exploratoire, le modèle d'un bâtiment a été modélisé à l'aide de TRNBuild puis couplé à un modèle de plantes. TRNBuild est une interface au sein de TRNSYS qui permet de créer et modifier toute information, autre que la géométrie, qui caractérise le bâtiment. Les charges considérées pour l'eAIB sont la ventilation, l'éclairage et les plantes. Les gains internes des équipements, tels que ceux des pompes du système hydroponique, sont négligés.

Le modèle de plantes utilisé est celui de développé par Ward et al. (2015) sous la forme d'une composante TRNSYS. Celui-ci est composé d'un bilan thermique, d'eau, de CO₂ ainsi que d'un modèle de croissance spécifique à la tomate (Vanthoor et al., 2011). Le modèle de croissance consiste à résoudre un bilan de carbone. De ce bilan, le LAI est recalculé à chaque pas de temps. Afin d'évaluer l'impact du modèle de plantes sur la charge latente de l'eAIB, le modèle de plantes a été modifié afin de transférer au modèle de bâtiment le flux d'énergie latente en plus du flux d'énergie convective à titre de gains internes divers. En effet, initialement, le bilan d'eau au sein de l'eAIB et des plantes était résolu par le modèle de plantes. Le modèle de plantes a été modifié afin que le bilan d'eau qui consistait à calculer l'humidité ambiante soit calculé par TRNBuild qui possède cette fonctionnalité. À chaque pas de temps, le modèle de plantes et de bâtiment interagissent jusqu'à convergence des résultats (Figure 3.1).

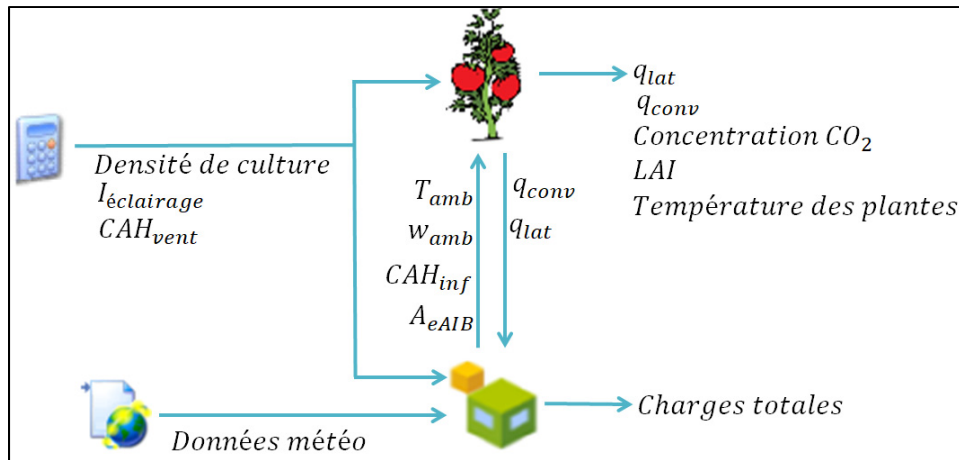


Figure 3.1 Interactions entre les modèles

D'autre part, un problème de discrétisation numérique au sein du modèle de plantes a été noté ; conséquemment, un pas de temps d'un par seconde est donc imposé afin que les modèles soient en mesure de converger vers une solution.

3.2.1 Modèle du bâtiment et de l'eAIB

Le bâtiment de cette étude est un bâtiment industriel de 877 m² revalorisé à des fins communautaires à Montréal. Construit en 1946, le bâtiment a un taux d'infiltration estimé à 3,05 l·s⁻¹·m⁻² (Bell, 2000) selon la superficie des murs extérieurs et la résistance thermique des murs est faible ($RSI = 0,89 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) (pour plus de détails se référer à l'ANNEXE I). Autrefois utilisé comme entrepôt, le bâtiment sera converti en pôle alimentaire à multiples usages. Ceux-ci incluent une salle polyvalente, une cuisine industrielle, un entrepôt et des espaces d'agriculture (Figure 3.2(a)). La répartition des espaces permet de déterminer les débits de ventilation minimaux selon la norme ASHRAE 62-2010 (ASHRAE, 2010b). D'autre part, des horaires d'occupation standards sont pris en compte. Enfin, la densité d'éclairage du bâtiment est estimée à 5 W·m⁻²_{plancher}.

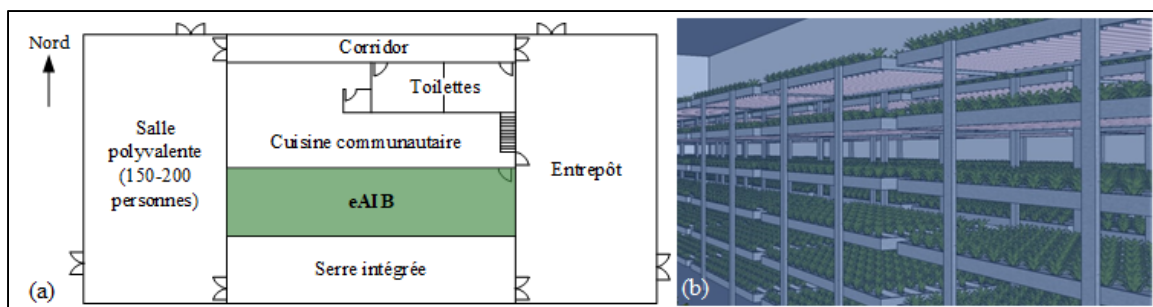


Figure 3.2 (a) Répartition des espaces dans le bâtiment et (b) vue intérieure de l'eAIB

L'espace étudié est un eAIB de $110,55 \text{ m}^2$ d'une hauteur de $5,3 \text{ m}$ dédié à la culture hydroponique de tomates qui peuvent être superposées à l'intérieur d'étagères illuminées par un éclairage de type DEL (Figure 3.2(b)). Son environnement est contrôlé et ses charges thermiques ne fluctuent pas beaucoup puisque les échanges thermiques avec l'extérieur sont limités. C'est pourquoi l'espace étudié permet d'observer l'impact direct des plantes sur leur environnement. De plus, dans le cas étudié, le revêtement intérieur prévu dans l'eAIB est hydrofuge afin d'assurer l'intégrité de l'enveloppe. En effet, puisqu'il s'agit d'un espace très humide, ce type de revêtement permet de retenir l'humidité dans l'espace et d'éviter la migration de vapeur d'eau au travers de l'enveloppe. Dans le modèle, cela signifie que dans l'eAIB, seul le volume d'air a une capacité d'absorption de l'humidité. Les gains internes des équipements, tels que ceux des pompes du système hydroponique, sont négligés ainsi que les impacts thermiques du système hydroponique.

En chauffage et en climatisation, un seul point de consigne est utilisé, soit 21°C . L'intervalle de température de confort des plantes est plus large que celui des humains, mais puisque l'objectif de cette étude est d'observer l'impact des plantes, ce paramètre demeure constant. Le taux d'humidité dans l'espace est aussi maintenu à une valeur constante de 75% d'humidité relative. Cela correspond à une humidité absolue de $0,0117 \text{ kg d'eau/kg d'air sec}$.

L'éclairage testé est de type DEL. Contrairement aux lampes au sodium, les pertes thermiques sont principalement convectives. Lorsque modélisées, les pertes convectives sont considérées comme instantanées, ce qui permet de mieux isoler l'impact thermique des plantes. D'autre

part, afin d'assurer un degré d'activité végétale suffisante, des lampes DEL de grande puissance seront considérées pour le modèle de référence. Cela correspond à une intensité d'éclairage de 480 W/m^2 dont l'efficacité est de 25 % (Ahn et al., 2014).

Dans cette étude, il n'y a pas de système d'enrichissement au CO_2 intégré au modèle de plantes. La concentration de CO_2 est donc maintenue par un renouvellement d'air suffisant à une valeur maximale d'environ 400 ppm aux conditions standards (ESRL, 2018), ce qui correspond à la concentration en CO_2 de l'air extérieur. Pour le modèle de référence, le débit de ventilation est de 1 h^{-1} . De plus, le *Type 2280* de TRNSYS est utilisé pour traiter la perte de chaleur latente induite par le refroidissement.

Bien que la vitesse d'écoulement recommandée est d'environ $0,5 \text{ m/s}$ (ASHRAE, 2011), la valeur par défaut de $0,3 \text{ m/s}$ du modèle de plantes de Ward et al. (2015) est celle utilisée.

3.2.2 Étude paramétrique

Différents scénarios sont effectués afin d'évaluer l'impact de l'intégration d'un modèle de plantes sur les charges d'un eAIB. Une analyse paramétrique est complétée sur les charges sensibles et latentes pour deux journées ayant les conditions extérieures présentées à la Figure 3.3.

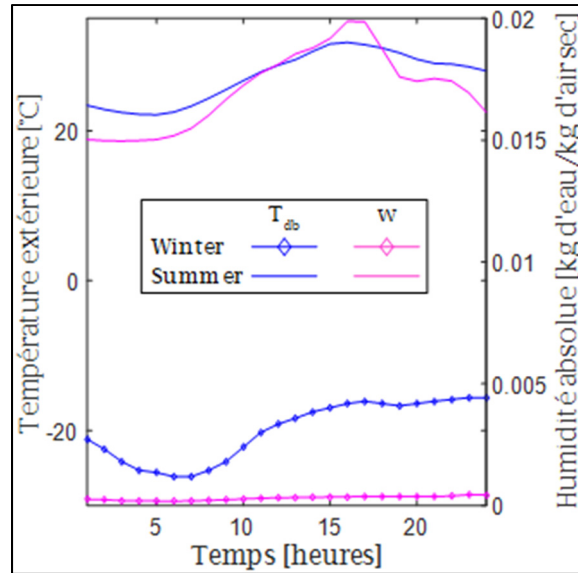


Figure 3.3 Conditions extérieures (température bulbe sec et humidité absolue) pour une journée d'hiver et d'été typique

Trois paramètres seront testés sur le modèle de référence afin d'évaluer leur influence sur les charges sensibles et latentes de l'eAIB :

- 1) La densité de culture (DC) permet d'observer l'impact de la quantité de plantes et est calculé selon l'équation (3.1).

$$DC = \frac{Aire_{cultivée}}{Aire_{eAIB}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Une valeur de 100 % estime qu'il n'y a qu'un seul étage de tomates. Pour le modèle de référence, la DC est de 100 %. La DC sera étudiée pour différentes valeurs, soit 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 % et 200 %. Lorsque la DC est de 200 %, cela représente un eAIB composé de deux étages.

- 2) L'intensité de l'éclairage artificiel sera étudiée pour des valeurs de 160 W/m², 320 W/m² et 480 W/m². Cela correspond à des lampes DEL de puissance faible, moyenne et élevée. Une intensité d'éclairage de 0 W/m² sera également évaluée afin d'observer le comportement des plantes lors de la période obscure.

- 3) Le débit de ventilation sera étudié pour différents taux de renouvellement, soit $0,02 \text{ h}^{-1}$, $0,5 \text{ h}^{-1}$, 1 h^{-1} , 3 h^{-1} et 5 h^{-1} . De plus, l'approche de distribution et la configuration des diffuseurs doit être complétée afin de ne pas excéder la vitesse d'écoulement de $0,3 \text{ m/s}$ sur les plantes qui est celle établie au sein du modèle de plantes.

3.3 Résultats et analyse

Les résultats de l'analyse paramétrique sont présentés afin d'évaluer l'impact des plantes sur les charges de l'eAIB. Les charges de chauffage sont positives alors que les charges de refroidissement sont négatives.

3.3.1 Densité de culture

L'impact de la densité de culture est évalué pour différents scénarios. Or, la puissance totale de l'éclairage DEL installée varie selon la densité de culture : le gain de chaleur convectif émis par les lampes DEL est donc proportionnel à la densité de culture.

En hiver, avec l'augmentation de la densité de culture, une diminution de la charge de chauffage sensible puis une augmentation de la charge de refroidissement sensible sont observées (Figure 3.4(a)).

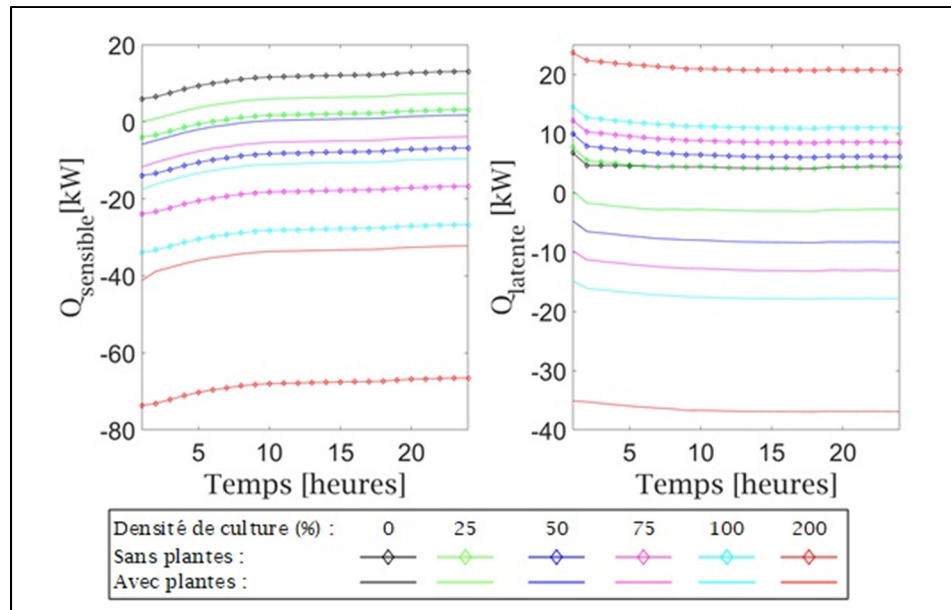


Figure 3.4 Impact de la densité de culture sur les charges
(a) sensibles et (b) latentes en hiver de l'eAIB

Cela est expliqué par le gain sensible induit par l'éclairage, mais celui-ci est retranché de 43 % par l'intégration de plantes dans les conditions étudiées. En effet, les plantes atténuent l'impact des DEL, car elles ont un effet de refroidissement (Graamans et al., 2017). Lors de la photosynthèse, les plantes transpirent et abaissent leur température, ce qui crée cet effet de refroidissement au sein de l'eAIB. Dans les conditions étudiées, la température des plantes s'abaisse d'environ 1°C par rapport à la température ambiante.

Puisque l'air extérieur en hiver est sec, l'air d'alimentation de l'eAIB doit être humidifié jusqu'au point de consigne. Lorsque la DC atteint 50 %, la charge de chauffage latente augmente davantage dû à la déshumidification liée au refroidissement sensible de l'air. Lorsque l'impact des plantes est considéré, une diminution de la charge de chauffage latent puis une augmentation de la charge de refroidissement latent sont observées avec l'augmentation de la superficie cultivée (Figure 3.4(b)). Cette importante charge de refroidissement latent est causée par la transpiration des plantes.

En été, avec l'augmentation de la densité de culture, une augmentation de la charge de refroidissement sensible est observée telle que présentée à la Figure 3.5(a). Lorsque la DC est de 200 %, la charge de refroidissement sensible causée par l'éclairage est alors 52 fois plus élevée qu'à 0 % et est diminuée de 43 % par l'effet de refroidissement des plantes. Ce gain de chaleur causé par l'éclairage artificiel a également été identifié comme étant problématique par Benis et al. (2017) en climat chaud, car cela augmente le potentiel de réchauffement global de ce type d'eAIB. Or, ils existent des techniques de pulsation de lampe DEL (Yeh & Chung, 2009) qui permettent de réduire la charge de l'éclairage sans compromettre le degré d'activité végétale.

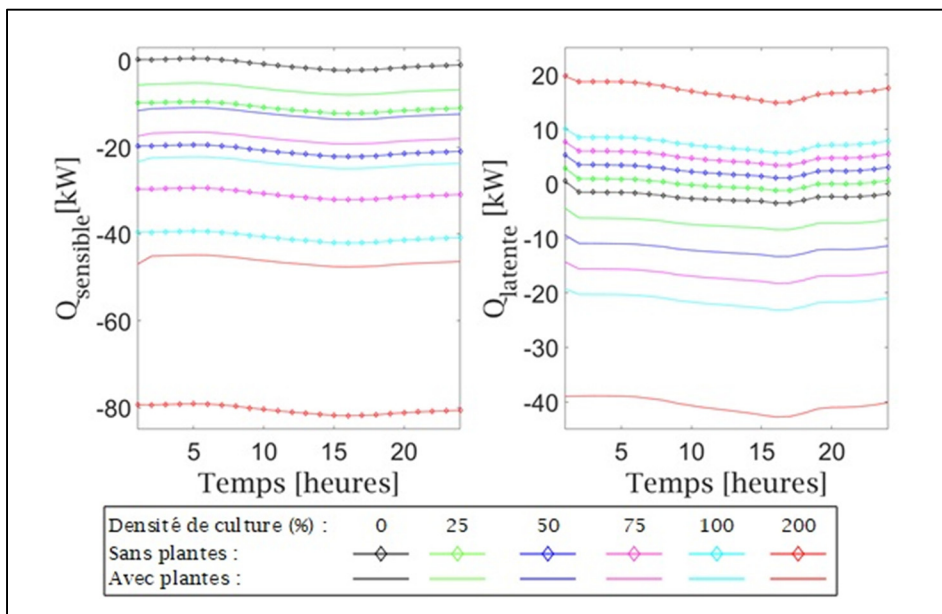


Figure 3.5 Impact de la densité de culture sur les charges
(a) sensibles et (b) latentes en été de l'eAIB

En été, puisque l'air est humide, l'air d'alimentation doit être déshumidifié. Avec l'augmentation de la densité de culture, la charge de chauffage latente augmente (Figure 3.5(b)). Lorsque l'impact des plantes est considéré, la charge de chauffage latente est transformée en charge de refroidissement latent dû à la transpiration des plantes.

Afin de résumer l'impact des plantes sur les charges de l'eAIB selon la densité de culture, les charges sensibles et latentes de la 24^{ème} heure de la journée d'hiver ont été extraites de la Figure 3.4 et présentées à la Figure 3.6 et Figure 3.7.

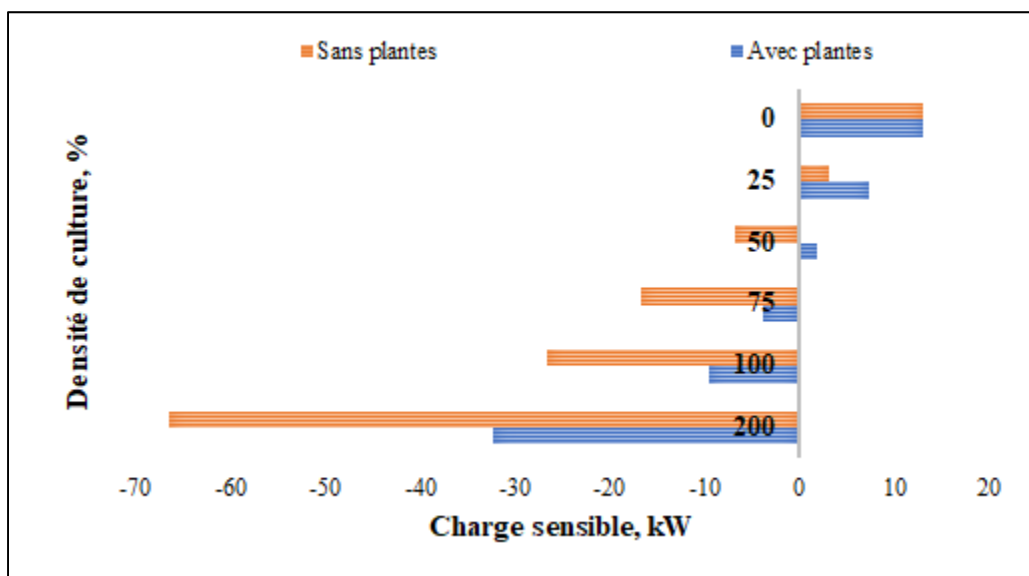


Figure 3.6 Impact des plantes sur les charges sensibles de l'eAIB selon la densité de culture

Pour les charges sensibles (Figure 3.6), la densité d'éclairage augmente avec la densité de culture, ce qui induit une charge de refroidissement sensible à partir de 50% lorsque l'impact des plantes n'est pas considéré et à partir de 75% lorsqu'il est considéré. Cela est expliqué par l'effet de refroidissement des plantes qui réduit la charge de refroidissement de l'eAIB.

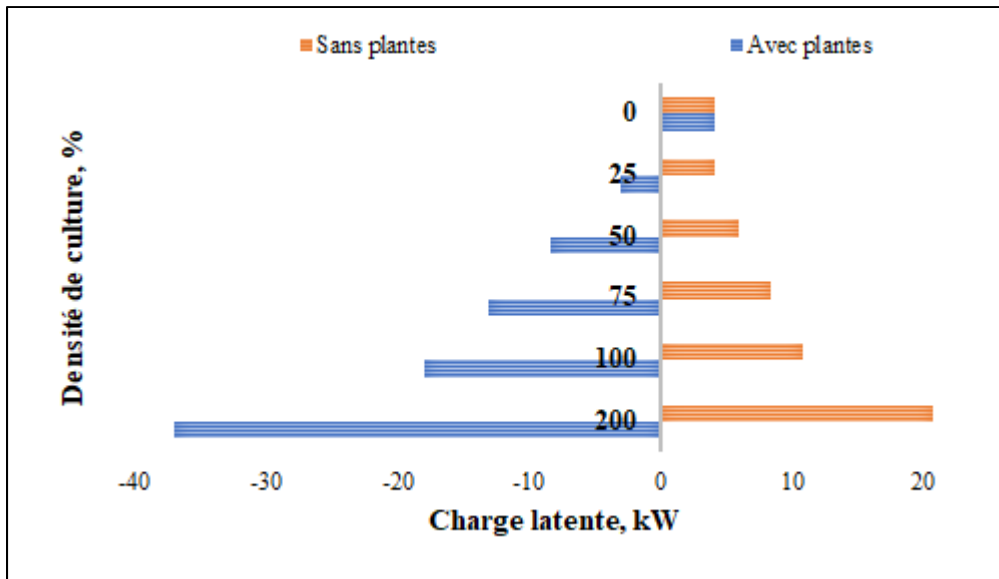


Figure 3.7 Impact des plantes sur les charges latentes de l'eAIB selon la densité de culture

Pour les charges latentes (Figure 3.7), l'utilisation d'un système de refroidissement pour contrecarrer les gains de chaleur des lampes DEL amène un assèchement de l'air, occasionnant une augmentation de la charge de chauffage latent. Or, lorsque l'effet des plantes est considéré, la charge de chauffage latent est largement compensée par l'effet de transpiration des plantes, et ce, peu importe la densité de culture.

3.3.2 Éclairage

Lorsque la DC est de 100 %, la diminution de l'intensité de l'éclairage entraîne un ralentissement du degré d'activité végétale. Cela diminue la charge de refroidissement latent et augmente la charge de chauffage sensible de l'eAIB (Figure 3.8).

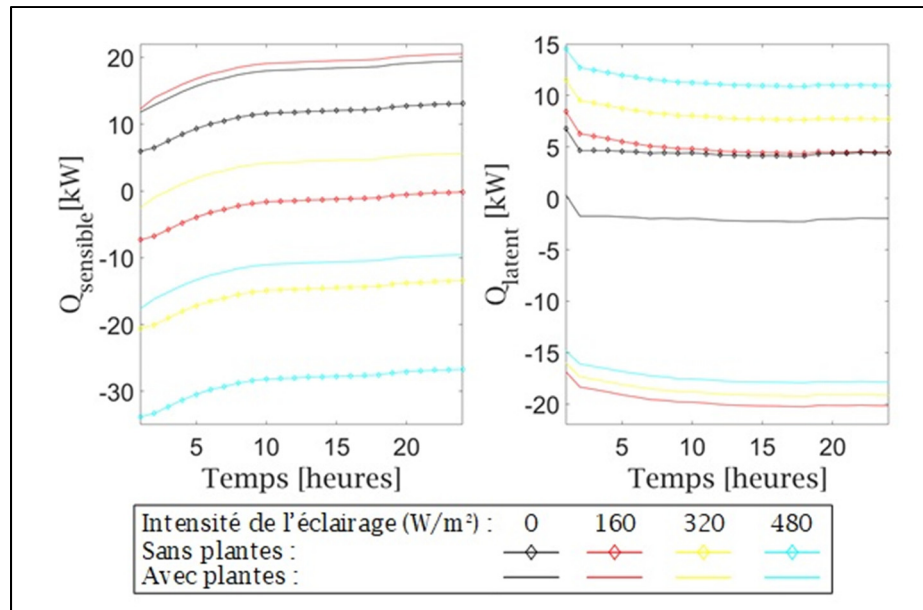


Figure 3.8 Impact de l'intensité d'éclairage sur les charges
(a) sensibles et (b) latentes en hiver de l'eAIB

En effet, lorsque l'intensité d'éclairage est minimale, l'effet de refroidissement des plantes est élevé et plus important que les gains d'éclairage, ce qui induit une augmentation de 45 % de la charge de chauffage sensible par rapport au cas sans plantes ni éclairage.

Alors que les autres conditions affectant le flux d'énergie induits par les plantes sont constantes (température et humidité ambiante, taux de CO_2 , LAI), les gains thermiques associés aux plantes varient selon l'intensité de l'éclairage (Tableau 3.3). Les résultats permettent d'établir que lorsque l'intensité de l'éclairage augmente, le flux de chaleur latente émis par transpiration augmente alors que l'effet de refroidissement des plantes diminue. Cette tendance peut également être observée dans les résultats obtenus par Graamans et al. (2017) pour le cas de laitues.

Tableau 3.3 Gains latents et sensibles des tomates selon l'intensité de l'éclairage

	Intensité de l'éclairage, W/m ²			
	0	160	320	480
Gains latents [W/m²]	58	223	243	261
Gains sensibles [W/m²]	-58	-188	-173	-155

Lorsqu'il n'y a pas d'éclairage, l'activité végétale se modifie : la photosynthèse n'est plus possible et il y a seulement respiration. Selon les résultats de simulation, l'effet de refroidissement est alors égal à l'effet de transpiration des plantes (Tableau 3.3). En se référant à l'équation (1.4), il s'agit d'un résultat attendu, car il n'y a pas de flux radiatif solaire ($q_{rad_abs,lw}$), le flux radiatif infrarouge avec l'environnement ($q_{rad,lw}$) est faible et qu'aucune énergie n'est stockée (q_{st}). De plus, la Figure 3.8(a) montre que lorsque les plantes sont en période obscure, elles génèrent une augmentation de la charge de chauffage sensible de 38 % par rapport au cas sans plantes. En été, cet effet de refroidissement pourrait être mis à contribution. En effet, les périodes obscures d'environ 8 heures pourraient être planifiées aux moments où la charge de refroidissement sensible est maximale.

Les résultats obtenus pourraient permettre de conclure qu'en été ou en climat chaud, il est préférable de sélectionner une intensité d'éclairage qui limite les charges de refroidissement sensible et favorise l'effet de refroidissement des plantes. Cependant, cela induirait une baisse de la productivité agricole, un facteur important qui doit aussi être considéré lors de la conception d'un eAIB.

Afin de résumer l'impact des plantes sur les charges de l'eAIB selon l'intensité d'éclairage, les charges sensibles et latentes de la 24^{ème} heure de la journée d'hiver ont été extraites de la Figure 3.8 et présentées à la Figure 3.9 et la Figure 3.10.

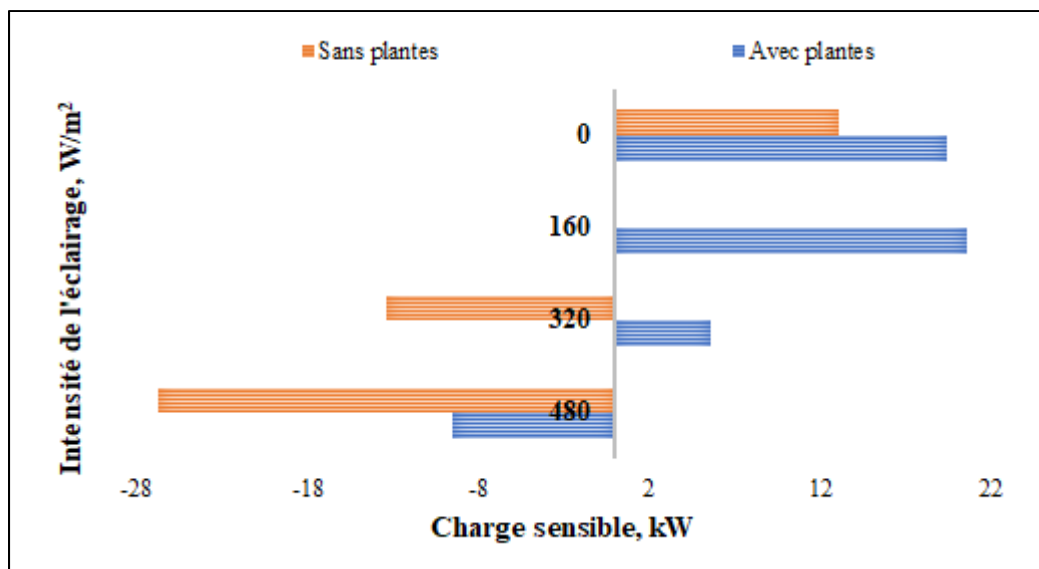


Figure 3.9 Impact des plantes sur les charges sensibles de l'eAIB selon l'intensité de l'éclairage

Pour les charges sensibles (Figure 3.9), la charge de refroidissement augmente avec l'intensité de l'éclairage lorsque les plantes ne sont pas considérées. Avec les plantes, l'effet de refroidissement annule les besoins en refroidissement, sauf lorsque l'intensité de l'éclairage est de 480 W/m². De plus, lors de la période obscure, les plantes augmentent la charge de chauffage de l'eAIB de 38 %.

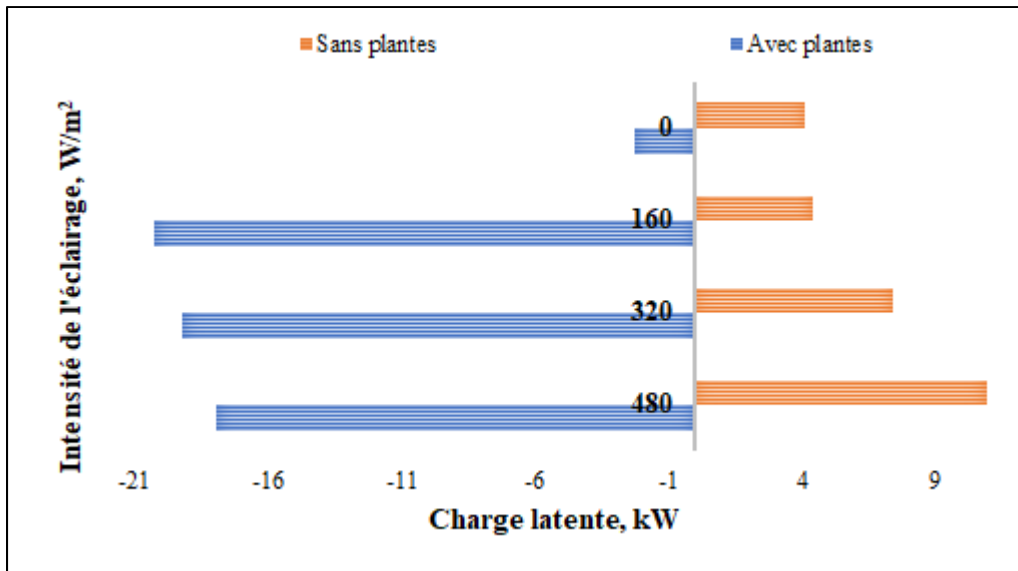


Figure 3.10 Impact des plantes sur les charges latentes de l'eAIB selon l'intensité de l'éclairage

Pour les charges latentes (Figure 3.10), les plantes induisent une importante demande de déshumidification dues à leur transpiration lorsqu'elles sont en photosynthèse. Tandis qu'en respiration (à $0 W/m^2$), l'effet de transpiration est moins important qu'en photosynthèse.

3.3.3 Ventilation

En hiver, lorsque l'intensité d'éclairage est maximale et que la DC est de 100 %, l'augmentation du nombre de changements d'air à l'heure permet de diminuer la charge de refroidissement latent induite par la transpiration des plantes puisque l'air extérieur est sec. D'autre part, cela permet de diminuer la charge de refroidissement sensible puis d'augmenter la charge de chauffage sensible (Figure 3.11(a)).

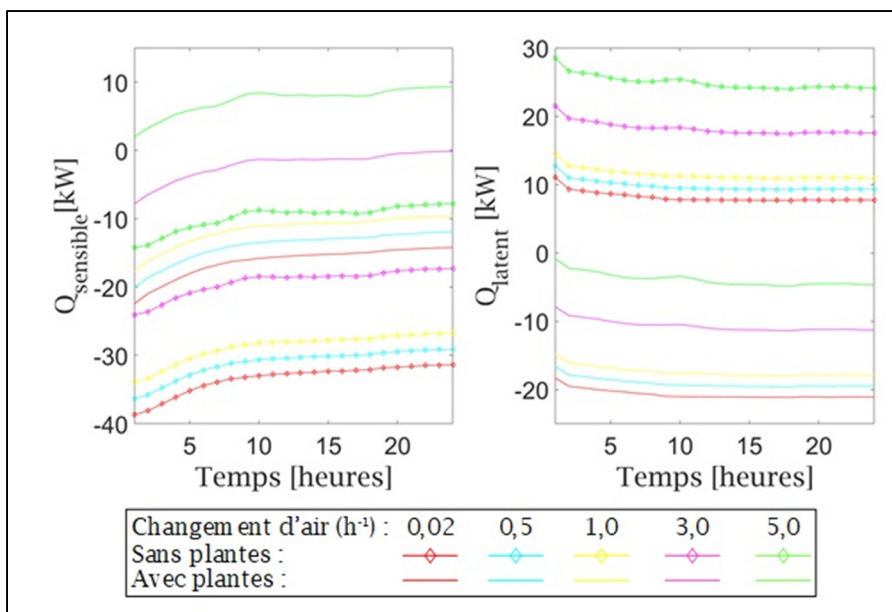


Figure 3.11 Impact du débit de ventilation sur les charges
(a) sensibles et (b) latentes en hiver de l'eAIB

En été, l'augmentation du nombre de changements d'air à l'heure augmente la charge de refroidissement sensible et latente puisque l'air extérieur est chaud et humide Figure 3.12.

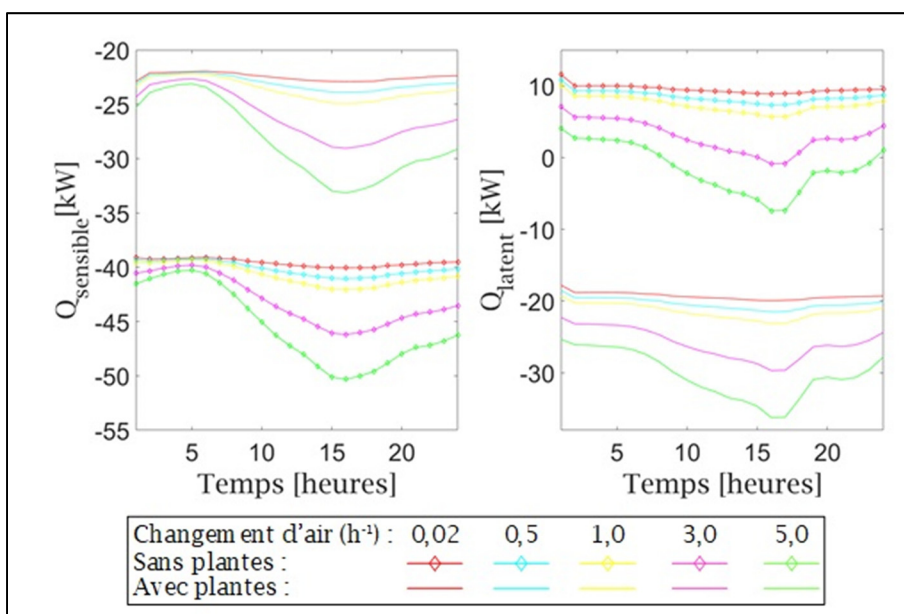


Figure 3.12 Impact du débit de ventilation sur les charges
(a) sensibles et (b) latentes en été de l'eAIB

3.4 Constats

L'intégration d'un modèle de plantes à un modèle d'eAIB a permis d'évaluer l'impact des plantes sur les charges de celui-ci. De plus, le modèle de plantes existant a été ajusté au contexte de l'étude, c'est-à-dire en créant une sortie correspondant au flux d'énergie latente et en assurant son bon fonctionnement en climat froid et en environnement contrôlé. Les résultats montrent que l'impact thermique des plantes au sein d'un eAIB ne peut être négligé et doit être considéré lors de la conception de systèmes CVCA et ce, même à une DC aussi basse que 25 %.

Les résultats ont également démontré que l'utilisation de l'air extérieur pour maintenir la concentration en CO₂ à 400 ppm augmente toutes les charges à l'exception de la charge de refroidissement latent en hiver. Or, dans le cas d'un bâtiment multizone, l'air de retour par les autres espaces est conditionné et a une teneur en CO₂ égale ou supérieure à celle de l'air extérieur. Tel qu'évalué par Nadal et al. (2017) dans le cas d'une serre intégrée à un bâtiment, cet air de retour peut être recyclé vers un eAIB afin d'améliorer l'efficacité globale du bâtiment.

Bien qu'exploratoire, cette première étude paramétrique comporte certaines divergences par rapport aux pratiques en agriculture en environnement contrôlé. Afin de mieux arrimer la recherche aux besoins, certaines modifications seront considérées dans le modèle de la deuxième étude portant sur l'impact des plantes sur les charges maximales pour les conditions de conception (CHAPITRE 4) :

- 1) La culture des tomates en étagères n'est pas une méthode très répandue. En réalité, la culture en étagères est plutôt dédiée à des légumes (laitues et fines herbes). Le modèle thermique de laitues de Graamans et al. (2017) est tout à fait adapté pour le calcul des charges d'un eAIB de culture en étagères.
- 2) Une étagère de culture ne peut pas couvrir 100 % de la superficie de plancher puisque de l'espace est nécessaire pour les équipements divers et l'opération de l'eAIB. Il est plus

raisonnable de considérer qu'une étagère a une superficie qui équivaut à 60 % de la superficie de plancher.

- 3) L'enrichissement en CO₂ à 1000 ppm est la norme en agriculture en environnement contrôlé, car cela améliore la productivité agricole. Cela impose donc un faible taux de ventilation et infiltration de l'eAIB, soit de 0,01 h⁻¹ à 0,02 h⁻¹.
- 4) L'utilisation d'un éclairage DEL ayant une faible efficacité de 25 % est discutable. En effet, les nouvelles installations agricoles se procurent des modèles plus actuels ayant maintenant une efficacité de 52 % (Royal Philipps, 2018). Les gains de chaleur induits par les lampes sont donc surestimés dans cette première étude. Bien qu'avec une meilleure efficacité ceux-ci soient réduits d'environ de moitié, ces gains entraînent tout de même d'importantes charges de refroidissement sensible qui ont également été observées par d'autres auteurs (p ex. Benis et al. (2015); Graamans et al. (2018)).

CHAPITRE 4

IMPACT DES PLANTES SUR LES CHARGES MAXIMALES D'UN EAIB SELON LES PARAMÈTRES DE CONCEPTION

4.1 Méthode du calcul des charges

Lors de la conception des systèmes CVCA, plusieurs étapes sont nécessaires afin d'effectuer un dimensionnement adéquat des systèmes CVCA. L'une de ces étapes consiste à déterminer les charges maximales de chauffage et de refroidissement. Il s'agit du taux maximum de chaleur qui doit être fourni ou retiré de l'espace pour maintenir les conditions intérieures selon certaines conditions raisonnablement extrêmes (Spitler, 2014). Pour un eAIB, les conditions intérieures dépendent des producteurs qui choisissent les conditions dans le but de maximiser la productivité agricole des plantes cultivées.

Différentes méthodes pour calculer les charges existent et sont basées sur différentes simplifications et hypothèses (Kavanaugh, 2006). Les méthodes principales sont :

- Méthode du bilan de chaleur (*Heat balance method* (HBM)) ;
- *Radiant time series method* (RTSM) ;
- *Transfer function method* (TFM) ;
- *Cooling load temperature difference, cooling load factor et solar load factor* (CLTD/CLF/SLF) *method*.

Afin de déterminer la plus grande charge pour laquelle il est raisonnable de dimensionner les systèmes CVCA, le calcul des charges considère les gains de chaleur externes (conduction par l'enveloppe du bâtiment, gains solaires transmis par les surfaces vitrées, ventilation et infiltration) ainsi que les gains de chaleur internes (occupants, éclairage, équipement). Ces gains sont influencés par les conditions de conception intérieurs et extérieurs (ASHRAE, 2007b). Les conditions intérieures sont déterminées par le propriétaire du bâtiment selon ses critères, les codes locaux et le confort thermique ciblé (Spitler, 2014). Les conditions extérieures utilisées sont généralement les données climatiques de conception à 1 % en

refroidissement et à 99,6 % en chauffage (ASHRAE, 2007b). Cependant, lorsque l'espace conditionné demande un contrôle plus précis des conditions environnementales intérieures, ce qui est le cas d'un eAIB, il est recommandé d'utiliser les données climatiques de design à 0,4 % en refroidissement. D'autre part, si l'eAIB est intérieur (et non en périphérie), l'impact des conditions extérieures sur la charge est limité.

Les gains internes à considérer pour le calcul des charges sont classés selon trois catégories : occupants, éclairage et équipement. Les occupants et certains équipements sont considérés à la fois comme des gains sensibles et latents tandis que l'éclairage est considéré comme un gain sensible uniquement. Les gains sensibles sont composés d'une fraction radiative et d'une fraction convective. Seulement la fraction convective des gains sensible est considérée instantanée (Spitler, 2014) tel qu'illustré à la Figure 4.1. Alors que les gains latents sont considérés totalement instantanés lors du calcul de la charge de refroidissement

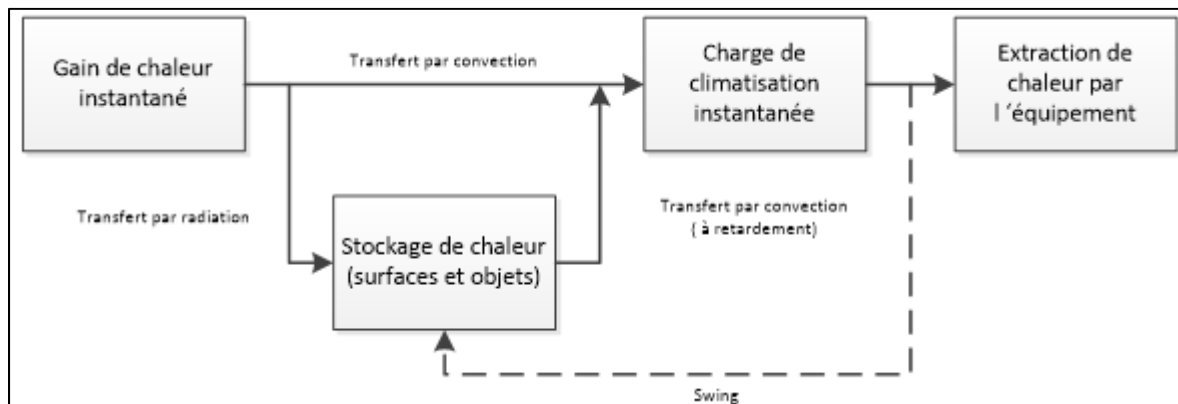


Figure 4.1 Flux de chaleur dans une zone thermique tirée de ASHRAE (2013b)

D'autres gains peuvent également être considérés, comme des équipements divers ou des procédés. Ces gains divers doivent être définis avec précaution selon l'horaire d'opération et le facteur de charge, ce qui les rend encore plus subjectifs que les gains des occupants et de l'éclairage (Spitler, 2014). Dans les eAIB, ces gains divers sont les gains de chaleur des plantes qui n'ont pas encore été considérées lors de l'estimation des charges maximales.

4.2 Approche de modélisation

Le but de cette deuxième étude est d'évaluer l'impact des plantes sur les charges maximales en utilisant un modèle thermique de laitues existant et validé en régime permanent (Graamans et al., 2017). L'approche consiste à d'abord estimer les charges maximales de l'eAIB, sans inclure l'impact des plantes, à l'aide du logiciel de simulation énergétique TRNSYS. D'autre part, le flux de chaleur sensible et le taux de vapeur d'eau émis par les laitues sont estimés par le modèle de laitues selon différentes hypothèses. Finalement, pour évaluer l'impact des plantes sur les charges maximales, une étude paramétrique est réalisée pour différentes conditions intérieures de l'air (température et humidité), densités de culture (qui a également un impact sur la puissance totale d'éclairage requis) et LAI. Une représentation de l'approche proposée est illustrée à la Figure 4.2.

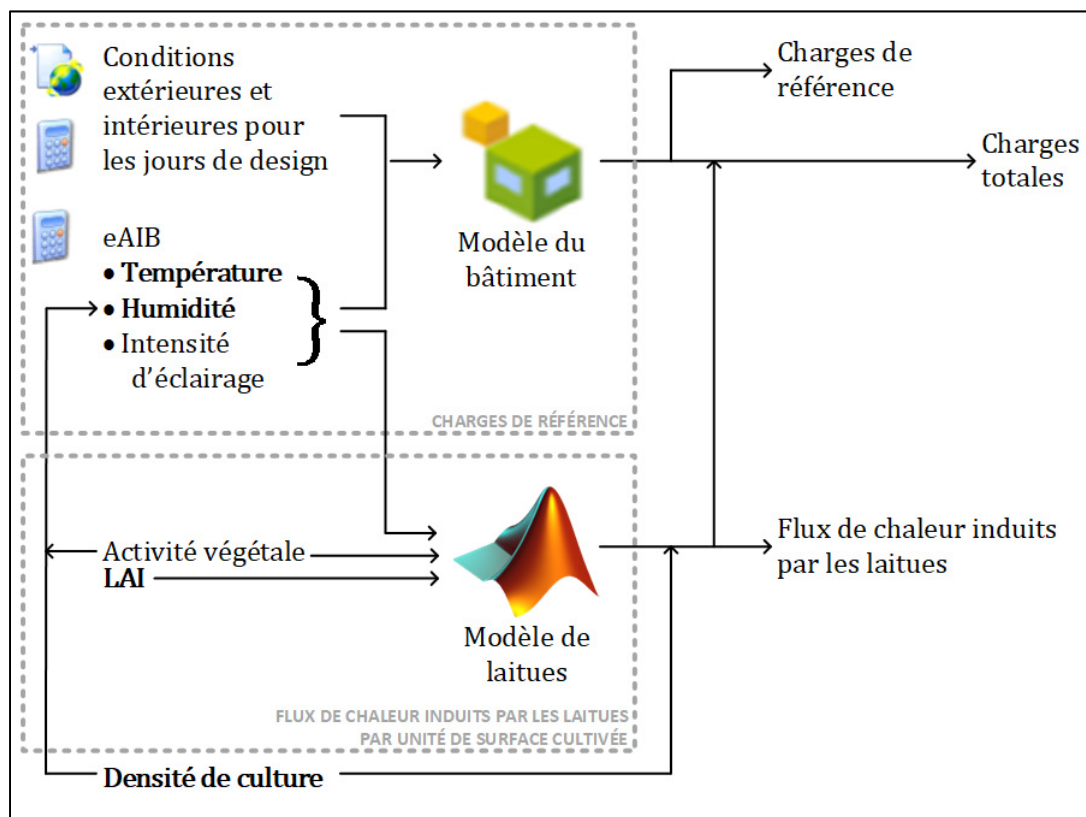


Figure 4.2 Résumé de l'approche de modélisation

4.2.1 Modèle du bâtiment et de l'eAIB

Le bâtiment et l'eAIB modélisé pour cette deuxième étude sont semblables à ceux de la première expérience, cependant les paramètres de conception et une répartition différente des espaces sont utilisés (Figure 4.3). Puisque le bâtiment est modélisé au sein de TRNBuild, la méthode du bilan de chaleur est utilisée pour calculer les charges des zones thermiques, mais n'inclut pas un calcul automatique des charges selon les conditions de conception pour effectuer le dimensionnement des systèmes (Crawley et al., 2008). Les conditions de conception (c.-à-d. conditions environnementales de conception et gains internes) sont donc définies manuellement dans TRNSYS selon ASHRAE 90.1-2013 (ASHRAE, 2013). Pour les conditions extérieures, les jours de conception sélectionnés correspondant aux données climatiques à 0,4 % en refroidissement et à 99,6 % en chauffage sont utilisés (Figure 4.4). Pour les conditions internes, les espaces adjacents à l'eAIB sont définis comme des espaces de bureaux de taille moyenne selon ASHRAE 90.1-2010. Afin de s'assurer que ces paramètres ont correctement été attribués manuellement : une vérification a été effectuée et est détaillée en ANNEXE III. les charges maximales sensibles de chauffage et de refroidissement pour une zone thermique intérieure ont été calculées avec OpenStudio, un interface d'Energyplus (Crawley, Lawrie, Pedersen, & Winkelmann, 2000) permettant un calcul automatique des charges pour les jours de conception utilisées pour le dimensionnement. Les différences obtenues entre les charges provenant de TRNSYS et de OpenStudio sont de 0,7 % et 3,3 % respectivement et le détail de cette vérification est présenté en ANNEXE III.

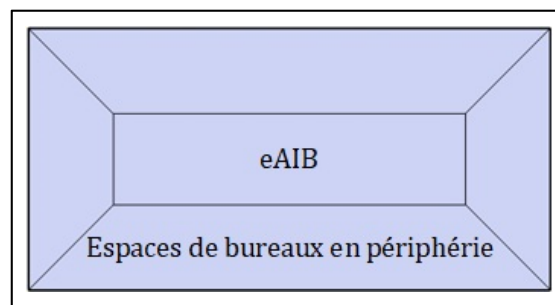


Figure 4.3 Répartitions des espaces

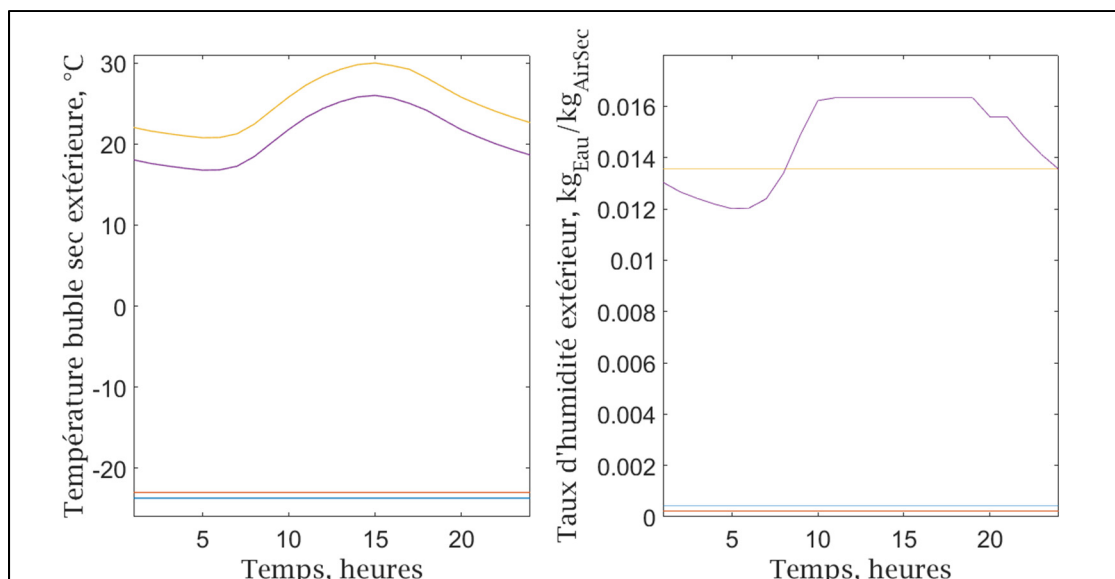


Figure 4.4 Conditions extérieures des jours de conception à 0,4% en refroidissement sensible (jaune) et latent (mauve) et à 99,6% en chauffage sensible (bleu) et latent (rouge)

L'espace de 110,55 m² étudié est un environnement entièrement contrôlé dédié à la culture hydroponique de laitues en étagères avec éclairage artificiel. C'est un espace protégé dont les conditions intérieures de l'air (température, humidité et concentration en CO₂) sont contrôlées afin de promouvoir la productivité agricole (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Conditions environnementales intérieures de l'eAIB

Variable contrôlée	Intervalle
Température	19 to 24°C (Brechtner et al., 1996)
Humidité	70 to 80 %
Concentration en CO ₂	700-1000 ppm (Kozai, Niu and Takagaki, 2015)
Intensité de l'éclairage	437 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$ (168 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$)

Les gains de chaleur considérés sont ceux transmis par conduction, par ventilation et les gains internes. Or, les gains de chaleur externes de l'eAIB ont un effet limité sur les charges puisqu'il y a peu d'échanges thermiques avec l'extérieur. De plus, les effets thermiques du système hydroponique ont été négligés.

Le taux de ventilation est maintenu à $0,02 \text{ h}^{-1}$ pour éviter la dilution du CO_2 injecté (Kozai, Niu and Takagaki, 2015). Aussi, des ventilateurs sont considérés afin d'assurer une vitesse d'air suffisante sur les feuilles, mais leur impact thermique est négligé.

Pour les calculs de charge de refroidissement, les gains de chaleur dégagée par cinq occupants et ceux dégagés par l'éclairage artificiel sont considérés en tout temps. Pour l'éclairage artificiel, des lampes de type DEL ont été choisies et les gains de chaleur convectifs dégagés sont considérés instantanés lors de la modélisation. Les lampes sélectionnées ont une puissance nominale estimée à 168 W par unité de surface cultivée ($168 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$) ayant une efficacité de 52 %. Cela se traduit en une intensité d'éclairage de $437 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$ lors de la photopériode.

Les paramètres du bâtiment et de l'eAIB sont définis dans le modèle TRNBuild. Les résultats de simulation, soient les sorties, sont les charges estimées pour les jours de conception, sans inclure l'impact thermique des plantes, selon un pas de temps de 10 minutes. Ces charges sont estimées pour des ensembles de paramètres choisis par les producteurs et les valeurs maximales atteintes sont les charges de référence utilisée dans l'étude paramétrique de l'eAIB.

4.2.2 Modèle de plantes

Les flux de chaleur sensible et latente émis par les plantes sont estimés par un modèle thermique de laitues codé dans MATLAB selon l'algorithme proposé par Graamans et al. (2017). Ce modèle validé expérimentalement en régime permanent possède ses propres hypothèses et simplifications à respecter :

- 5 % de la lumière du RPA émis par les DEL ne se rend pas aux feuilles des laitues puisque celles-ci couvrent 95 % de superficie dédiée à la culture (Tei et al., 1996) ;
- La concentration en CO_2 est élevée (700-1000 ppm) ;
- Le flux de chaleur infrarouge échangé entre les plantes et l'environnement est négligé ;

- Des valeurs statiques de la résistance aérodynamique de la couche limite (r_a) sont utilisées. Si des ventilateurs sont utilisés pour forcer la circulation de l'air, r_a est de 100s/m, sinon une valeur de 200s/m est recommandée.

Les entrées du modèle sont les conditions environnementales intérieures (puissance totale de l'éclairage installé, température et humidité) et LAI, qui peut varier entre 0 et 10 pour de la laitue hydroponique (Fraile-Robayo, Álvarez-Herrera, Reyes M, Álvarez-Herrera, & Fraile-Robayo, 2017). Une fois que le bilan d'énergie est résolu, les flux d'énergie sensible (convective seulement) et latente par surface cultivée sont estimés en respiration et en photosynthèse. Ces flux sont ensuite couplés au modèle de bâtiment et considérés comme des gains internes divers.

Afin de considérer les flux de chaleur induits par les plantes qui sont appropriés à l'estimation des charges maximales, cette étude propose des valeurs à utiliser pour certains paramètres, tel que l'activité végétale et LAI. Cette proposition est basée sur l'impact des plantes sur les charges d'un eAIB qui a été évalué dans le cadre de l'étude exploratoire présentée au CHAPITRE 3 de ce mémoire.

L'activité végétale varie entre deux états : (1) photosynthèse (avec l'éclairage allumé lors de la photopériode) et (2) respiration (avec l'éclairage éteint lors de la période obscure). La valeur de LAI minimale de zéro est utilisée lorsque les laitues n'ont pas encore développé leurs feuilles, tandis que la valeur de LAI maximale dépend de la méthode de croissance utilisée par le producteur. En effet, les laitues peuvent atteindre un LAI maximal de 10 lorsque toutes les laitues croient au même rythme, selon une méthode de croissance à un seul stade. D'un autre côté, les laitues peuvent atteindre un LAI maximal de 2,1 lorsque différents stades de croissance coexistent en tout temps (Tei et al., 1996), selon une méthode de croissance à stades diversifiés. Un bref survol des hypothèses de conception choisies pour déterminer ces paramètres afin d'estimer les charges maximales est présenté et résumé au Tableau 4.2.

4.2.2.1 Charge de chauffage sensible

La charge de chauffage sensible maximale est atteinte lorsque l'effet de refroidissement des plantes est maximum, c.-à-d. lorsque les lumières sont éteintes pendant la période obscure et que LAI est maximum. Si l'impact thermique des plantes est négligé à cette étape, la charge de chauffage sensible pourrait être sous-estimée. En effet, les résultats de la première étude de ce mémoire ont montré une augmentation de 38 % de la charge de chauffage sensible dû à l'effet de refroidissement des plantes lors de la période obscure (section 3.3.2).

4.2.2.2 Charge de refroidissement sensible

La charge de refroidissement sensible maximale est rencontrée lorsque LAI est nulle, c.-à-d. lorsque les plantes n'ont aucun impact sur les charges, et que les lumières sont allumées, pour encourager la croissance des plantes. La charge de refroidissement sensible maximale estimée est donc la même que la charge de référence qui est principalement influencée par les gains de chaleur dégagés par les lampes qui varient selon la densité de culture.

4.2.2.3 Charge de refroidissement latent

La charge de refroidissement latent maximale est rencontrée lorsque l'effet de transpiration des plantes est maximum, c.-à-d. lors de la photopériode (Graamans et al., 2017) et que LAI est maximum. Et ce même si les gains de chaleur dégagés par les lampes induisent un refroidissement sensible et indirectement un refroidissement latent.

Tableau 4.2 Proposition des paramètres des plantes et leurs valeurs à utiliser pour estimer les charges maximales

Type de charge	L'impact thermique des plantes doit être considéré?	Paramètres des plantes		État de l'éclairage
		Activité	LAI	
Chauffage sensible	Oui	Respiration	2.1/10	Éteint
Refroidissement sensible	Non	-	0	Allumé
Refroidissement latent	Oui	Photosynthèse	2.1/10	Allumé

4.2.3 Étude paramétrique

Une étude paramétrique est menée afin de déterminer l'impact des plantes sur les charges maximales estimées en variant la densité de culture, la température, l'humidité et le LAI. Tel qu'expliqué à la section 4.2.2, l'impact thermique des plantes est seulement pris en compte pour estimer les charges de chauffage sensible et de refroidissement latent. L'étude paramétrique est complétée pour différents ensembles de paramètres détaillés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Paramètres de l'étude paramétrique

Paramètre	Intervalle	Taille du pas
Température, °C	19-24	1
Humidité relative, %	70-80	2
Densité de culture, %	60-720	20
LAI	0, 2.1 or 10	N/A

Les points de consigne (température et humidité) sélectionnées sont basées sur les valeurs proposées par la littérature (section 4.2.1). Pour la densité de culture, elle augmente la quantité de plantes cultivées à mesure que la quantité d'étagères illuminées augmente. Un étage correspond à une DC de 60 % afin que 40 % de la superficie au sol soit libérée pour accueillir les équipements et permettent les opérations des travailleurs. Les charges de référence, c.-à-d. les charges de l'eAIB, sans inclure les plantes, tiennent en compte que la puissance totale

d'éclairage installée augmente avec la densité de culture. Pour le LAI, il est évalué pour un LAI de 2.1 et 10.

4.3 Résultats et analyse

Les résultats de l'étude paramétrique détaillée au Tableau 4.3 sont présentés et analysés. Les flux de chaleur induits par les plantes pour inclure l'impact des plantes lors de l'estimation des charges de l'eAIB peuvent être extraits.

4.3.1 Impact des plantes sur la charge de chauffage sensible

La charge de chauffage sensible maximale de référence de l'eAIB varie entre 9 kW et 12 kW lorsque la température varie entre 19°C et 24°C, indépendamment de l'humidité relative (lignes bleues dans la Figure 4.5). De façon plus générale, cela correspond à une charge qui varie entre 0,08 W/m² et 0,11 W/m². Puis, l'impact des plantes est évalué pour deux différentes valeurs de LAI (2,1 et 10) lorsque la densité de culture augmente. La charge de chauffage sensible maximale est significativement plus élevée que la charge maximale de référence avec l'augmentation de la densité de culture, tel qu'illustré à la Figure 4.5 et ce même si le degré d'activité des plantes est moins élevé en respiration qu'en photosynthèse.

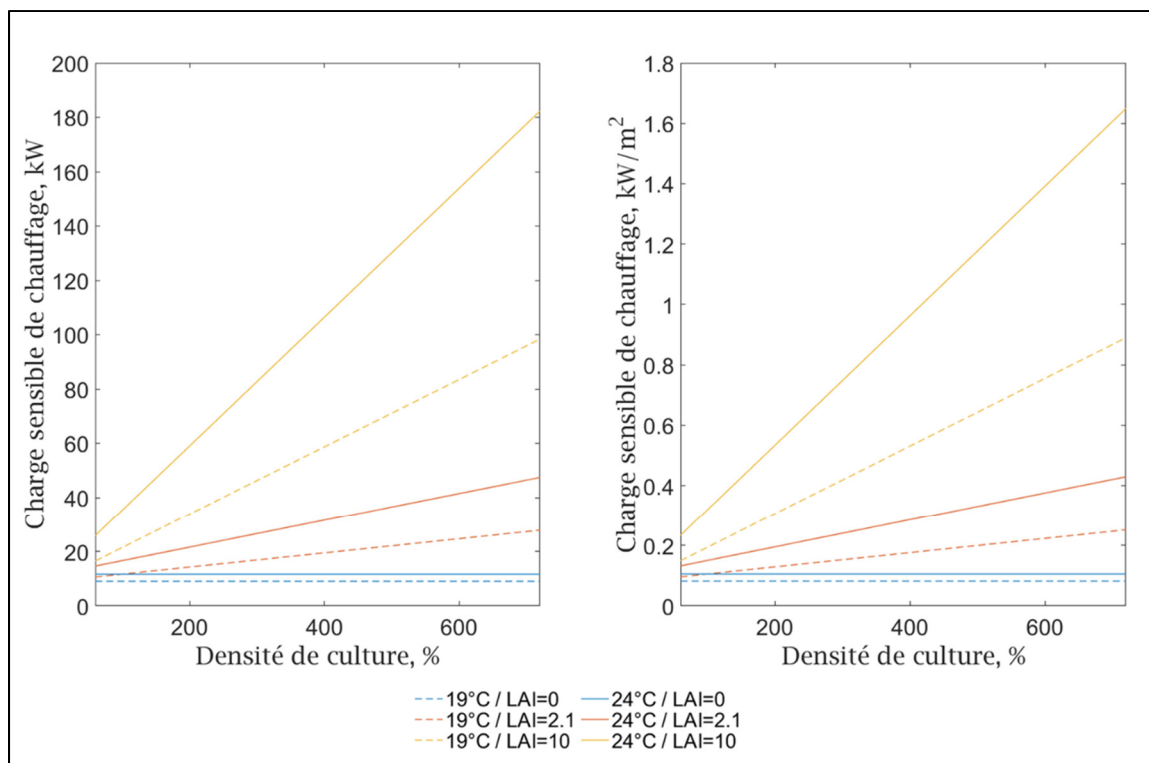


Figure 4.5 Variation de la charge de chauffage sensible maximale de l'eAIB selon la densité de culture pour un taux de ventilation de 0.02 h^{-1} totale (gauche) et par unité de surface (droite)

Pour une DC de 60 %, la charge maximale de chauffage est de 1,2 à 1,25 (pour LAI=2,1) et de 2,1 à 2,2 (pour LAI=10) fois plus grande que la valeur de référence. Tandis qu'à une DC de 720 %, elle est de 3,7 à 4,1 (pour LAI=2,1) et de 13,7 à 15,7 (pour LAI=10) fois plus grande. Ces variations sont induites par les flux de chaleur sensible (c.-à-d. l'effet de refroidissement) des plantes qui sont influencés par les conditions environnementales intérieures et le LAI. De façon générale, les résultats montrent que la charge est de $0,10 \text{ kW/m}^2$ à $0,13 \text{ kW/m}^2$ (pour LAI=2,1) et de $0,16 \text{ kW/m}^2$ à $0,23 \text{ kW/m}^2$ (pour LAI=10) pour une DC de 60 % et de $0,30 \text{ kW/m}^2$ à $0,37 \text{ kW/m}^2$ (LAI=2,1) et de $1,12 \text{ kW/m}^2$ à $1,65 \text{ kW/m}^2$ (pour LAI=10) pour une DC de 720 %.

4.3.2 Impact des plantes sur la charge de refroidissement latent

Pour une DC de 60 %, la charge de refroidissement latent maximale de référence de l'eAIB est entre -0,6 kW et -1,9 kW et pour une DC de 720 %, la charge est entre -8,6 kW et -34 kW. De façon plus générale, cela correspond à une charge entre -0,01 W/m² et -0,02 W/m² pour une DC de 60 % et entre -0,08 W/m² et -0,31 W/m² pour une DC de 720 %. Lorsque la densité de culture augmente, la densité d'éclairage augmente et cela induit une augmentation de la charge de refroidissement sensible. Le refroidissement de cet air est accompagné d'un processus de déshumidification. Afin de maintenir les conditions de l'eAIB, il faut donc humidifier l'air de l'eAIB lorsque l'impact des plantes n'est pas considéré, c'est pourquoi les charges obtenues sont négatives pour un LAI de zéro (Figure 4.6).

Ensuite, l'impact des plantes est évalué pour deux différentes valeurs de LAI (2,1 et 10) lorsque la densité de culture augmente (Figure 4.6). L'ajout des plantes induit alors une importante charge de refroidissement latent, tout particulièrement pour un LAI de 10, et nécessiterait la mise en place d'un système de déshumidification afin de maintenir le point de consigne d'humidité relative.

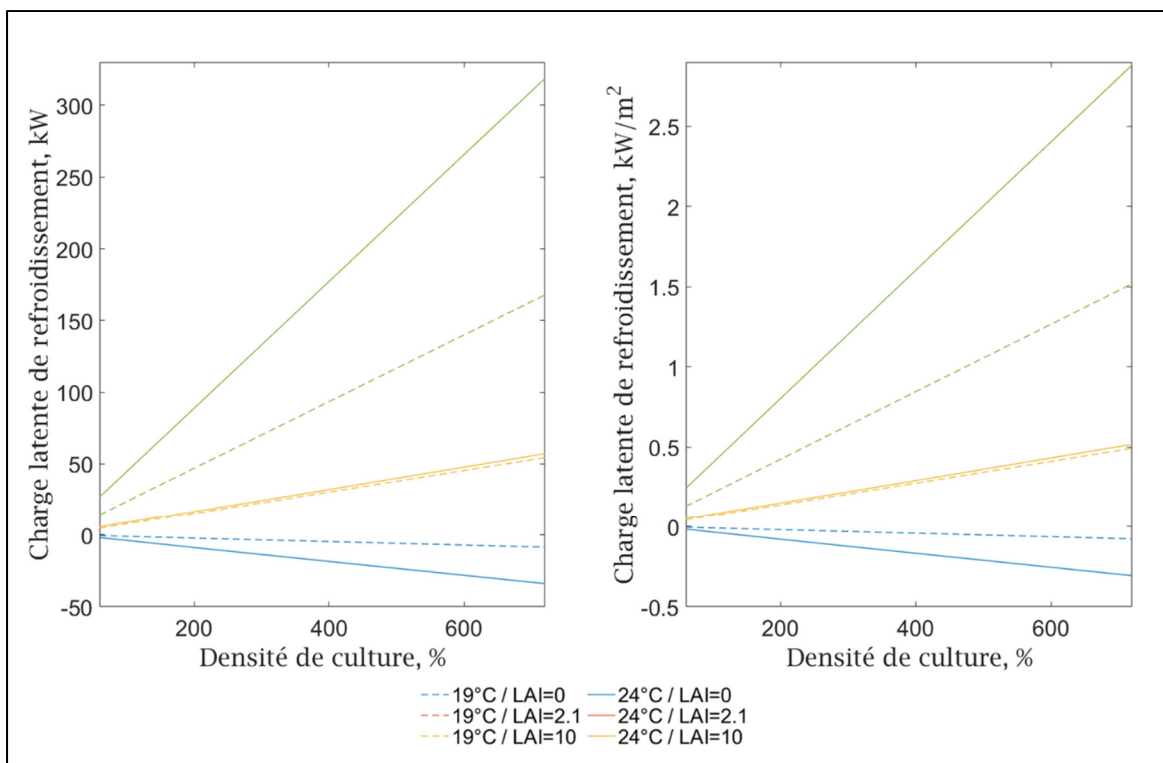


Figure 4.6 Variation de la charge de refroidissement latent maximale de l'eAIB selon la densité de culture pour un taux de ventilation de 0.02 h^{-1} totale (gauche) et par unité de surface (droite)

Pour une DC de 60 %, la charge maximale de refroidissement latent est de 2,9 à 8,5 (pour LAI=2,1) et de 13,9 à 25,2 (pour LAI=10) fois plus grande que la charge de chauffage latent de référence. Tandis qu'à une DC de 720 %, elle est de 1,7 à 6,5 (pour LAI=2,1) et de 9,4 à 19,5 (pour LAI=10) fois plus grandes. Les variations de la charge latente sont induites par les flux de chaleur latente (c.-à-d. la transpiration) des plantes qui sont influencés par les conditions environnementales intérieures et la valeur de LAI. Cette grande charge de refroidissement latent induite est souvent prise en charge en réalité par un système de déshumidification indépendant pour des projets d'agriculture où l'environnement est entièrement contrôlé, comme les PFAL ou les serres fermées. De façon générale, les résultats montrent que pour une DC de 60 %, la charge est de $0,05 \text{ W/m}^2$ à $0,05 \text{ W/m}^2$ (pour LAI=2,1) et de $0,13 \text{ W/m}^2$ à $0,24 \text{ W/m}^2$ (pour LAI=10). Pour une DC de 720 %, la charge est de $0,49 \text{ W/m}^2$ à $0,51 \text{ W/m}^2$ (pour LAI=2,1) et de $1,52 \text{ W/m}^2$ à $2,88 \text{ W/m}^2$ (pour LAI=10).

L'impact des plantes sur la charge de chauffage sensible et de refroidissement latent est démontré clairement par l'analyse des résultats présentés à la Figure 4.5 et Figure 4.6. Les résultats ont été obtenus en couplant les résultats d'un modèle de laitues à un eAIB selon une approche développée dans cette recherche pour estimer les charges maximales d'un eAIB utiles au dimensionnement des systèmes CVCA. Afin de faciliter le calcul, les flux de chaleur sensible et latente induits par les plantes sont présentés pour l'espace étudié.

4.3.3 Flux de chaleur de chaleur sensible et latente des plantes

Pour assister le processus de conception, les flux de chaleur sensible et latente des laitues sont proposés et basés sur les sorties obtenus par la résolution du modèle de laitues de (Graamans et al., 2017). Ces valeurs sont valides seulement pour un espace d'agriculture entièrement contrôlé ayant une densité d'éclairage artificiel équivalent à $437 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$, un taux de ventilation de $0,02 \text{h}^{-1}$, une circulation d'air induite par des ventilateurs et un taux de CO_2 maintenu entre 700 et 1000 ppm. Les flux de chaleur sensible des laitues en respiration pour différentes conditions intérieures d'air et un LAI de 2,1 et de 10 sont présentés graphiquement à la Figure 4.7. L'effet de refroidissement est plus important à haute température et basse humidité et varie entre - 45 et - 24 $\text{W}/\text{m}^2_{\text{cultivated}}$ pour un LAI de 2,1 et entre - 214 et - 112 $\text{W}/\text{m}^2_{\text{cultivated}}$ pour un LAI de 10.

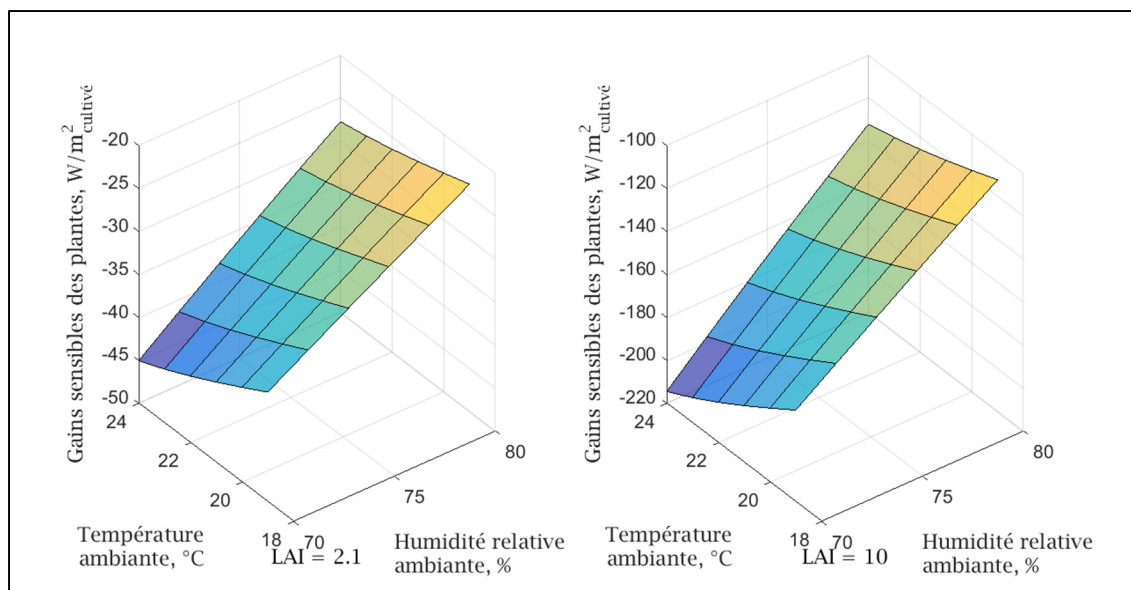


Figure 4.7 Flux de chaleur sensible des plantes en respiration pour LAI=2.1 (gauche) et LAI=10 (droite)

Les flux de chaleur latente des laitues en photosynthèse, pour différentes conditions intérieures d'air et un LAI de 2,1 et de 10, sont tel que présenté à la Figure 4.8. La transpiration est plus importante à haute température et basse humidité et varie entre 63 et 110 $W/m^2_{cultivated}$ pour un LAI de 2,1 et entre 210 et 400 $W/m^2_{cultivated}$ pour un LAI de 10.

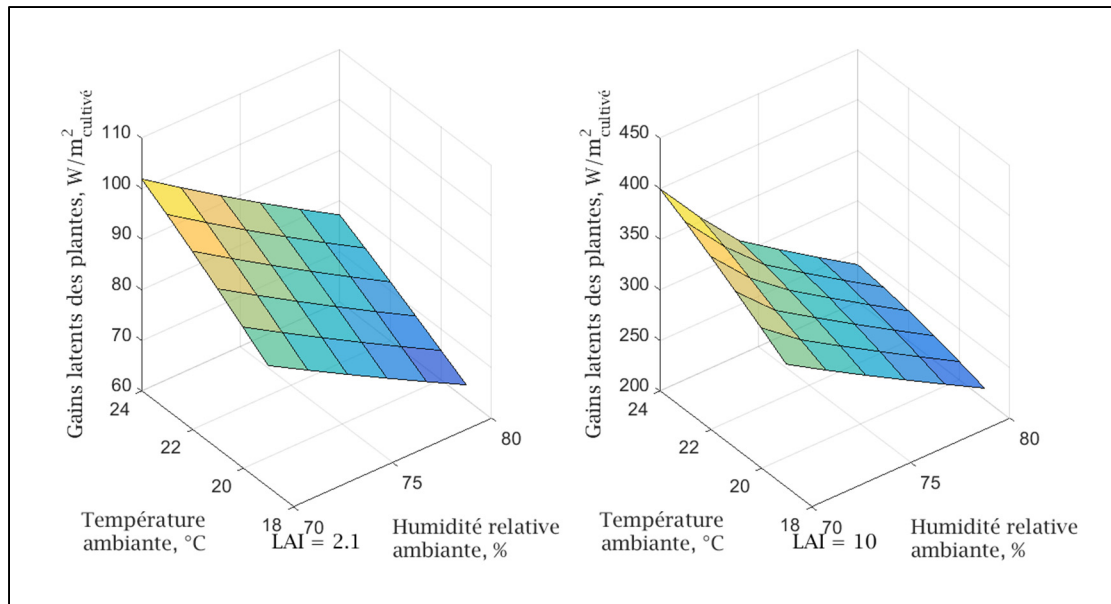


Figure 4.8 Flux de chaleur latente émis par les plantes en photosynthèse pour LAI=2.1 (gauche) et LAI=10 (droite)

Ces flux de chaleur sont présentés sous forme de tableaux à l'ANNEXE IV et peuvent être utilisés pour estimer les gains de chaleur d'un eAIB afin de compléter le calcul des charges.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 Interprétation des charges maximales estimées

L'approche développée peut permettre de dimensionner adéquatement un système de chauffage d'un eAIB. Cependant, si les charges maximales de chauffage estimées par l'approche développée sont utilisées directement pour dimensionner le système de chauffage, cela pourrait possiblement mener en pratique à un système de chauffage surdimensionné. En effet, bien qu'estimer selon une approche permettant de calculer la charge maximale raisonnable, la charge maximale de chauffage sensible obtenue selon une simulation annuelle pourrait être beaucoup moins élevée que celle calculée selon l'approche développée dans ce mémoire. Tout particulièrement lorsque les producteurs choisissent de faire croître les laitues sur une période de 24h, sans période obscure. La charge de chauffage sensible maximale sous conditions de conception serait alors rencontrée lorsqu'il n'y a pas de plantes et que les lumières sont éteintes.

Inversement, si l'impact des plantes est négligé lors du calcul de la charge de chauffage utilisée pour dimensionner le système de chauffage, le point de consigne de l'eAIB pourrait ne pas être maintenu en tout temps. En pratique, si la période obscure s'allonge et que la température ambiante diminue, cela pourrait amener des risques de condensation sur les surfaces plus froides puisqu'il s'agit d'un espace ayant un haut taux d'humidité. En effet, si les feuilles de laitues, les murs, plafond ou plancher atteignent le point de rosée, cela peut causer des maladies ou mettre l'intégrité de l'enveloppe en péril. Puisque les feuilles ont généralement une température plus basse que l'air ambiant, les risques de condensation sur celles-ci sont bien connus en horticulture. Or, en climat froid, les pertes par conduction par le toit, dans le cas de l'eAIB étudié, peuvent également abaisser la température des surfaces sous le point de rosée si le point de consigne n'est pas maintenu.

L'approche développée permet aussi d'assister le processus du dimensionnement du système de déshumidification indépendant. Cependant, les charges maximales de refroidissement latent obtenues avec l'approche développée pourraient être surestimées pour deux raisons :

- La charge de refroidissement latent est affectée par le choix du matériau de revêtement des murs, plancher et plafond qui, dans le cas de l'eAIB étudié, n'ont pas de capacité d'absorption d'humidité et donc, seul l'air absorbe l'humidité. Cela a été choisi afin d'assurer l'intégrité de l'enveloppe et des cloisons intérieures, peut importer les conditions intérieures d'air dans l'eAIB. L'ajout de matériaux ayant une capacité d'absorption non négligeable, par exemple un plancher en béton ou encore l'ajout d'une structure en bois pour supporter le système hydroponique, abaisserait les charges maximales de refroidissement latent estimées dans cette étude.
- Les pratiques réelles montrent que les systèmes de déshumidification d'un espace d'agriculture en environnement entièrement contrôlé sont dimensionnés pour répondre aux besoins en période obscure (DCA, 2018). En effet, cette période a été identifiée comme étant critique, car lorsque les lumières sont éteintes entre la photopériode à la période obscure, la demande de refroidissement chute ainsi que la déshumidification de l'air qui en résulte. Or, ce n'est pas ce qui a été obtenu lors de la première étude. En effet, pour le cas étudié, la déshumidification engendrée par le système de refroidissement sensible n'est pas suffisante pour maintenir les conditions intérieures puisque le flux de chaleur latente en photosynthèse est plus important qu'en respiration. Cette différence entre les résultats théoriques et les pratiques réelles portent à croire que la déshumidification engendrée par le refroidissement dans le modèle TRNSYS par l'utilisation du *Type 2280* a été sous-estimée et donc que les charges maximales de refroidissement latent ont été surestimées dans cette étude.

D'autre part, si le système de déshumidification autonome n'a pas une capacité suffisante, l'humidité ambiante augmente ainsi que le point de rosée. Les risques de condensation rencontrés sur les feuilles de laitues, les murs, plafond ou plancher sont alors les mêmes que lorsque la température ambiante chute. En réalité, lorsque la capacité du système de déshumidification n'est pas suffisante, de petits systèmes de déshumidification portables et

autonomes sont ajoutés. Cependant, il est plus difficile de maintenir le point de consigne d'humidité avec ces petits équipements qui ont également une moins longue durée de vie (DCA, 2018).

Les flux de chaleur des plantes dépendent de paramètres subjectifs déterminés unilatéralement par les producteurs : points de consigne (température et humidité), durée de la photopériode, densité de culture et méthode de croissance à stades diversifiés ($LAI=2,1$) ou à un seul stade ($LAI=10$). Or, les résultats de la deuxième étude paramétrique ont également montré que certains paramètres avaient plus d'influence que d'autres sur les charges maximales de chauffage sensible et de refroidissement latent d'un eAIB :

- 1) Présence ou absence d'une période obscure (affecte seulement la charge de chauffage sensible maximale) ;
- 2) Densité de culture ;
- 3) Méthode de croissance à stades diversifiés ou à un seul stade simultanément ;
- 4) Conditions intérieures de l'air (température et humidité).

Enfin, lors de la conception préliminaire d'un eAIB, l'utilisation de l'approche développée dans ce mémoire permet un dialogue entre les concepteurs des systèmes CVCA et les producteurs afin d'optimiser la balance entre les performances des systèmes CVCA (consommation énergétique, appel de puissance, maintien des conditions environnementales intérieures) et une productivité agricole de qualité selon des critères économiques, sociaux et environnementaux.

5.2 Performances des modèles de plantes

Dans cette recherche, deux modèles de plantes ont été utilisés. Dans chacune des études paramétriques, ceux-ci ont démontré leur performance ainsi que leurs limites.

5.2.1 Modèle de tomates adapté de Ward et al. (2015)

La première étude a permis d'évaluer les performances du modèle de tomates qui a été adapté au contexte de l'étude. Les résultats obtenus ont permis de constater que le bilan thermique fonctionne tel qu'attendu et que le modèle peut être utilisé pour estimer les charges maximales ou lors d'une simulation annuelle. Cependant, les bilans de croissance et de CO₂ devront être revus. En effet, peu importe le scénario simulé, la valeur de LAI calculée par le bilan de croissance tend dès le premier pas de temps vers la valeur maximale (environ de 3 pour les tomates). Ce comportement porte à croire que la résolution numérique du bilan de croissance de Vanthoor, de Visser, et al. (2011) au sein du modèle de plantes est défailante pour l'étude de cas. Une fois revu, le bilan de croissance sera un outil important pour étudier la productivité agricole de différents scénarios. Par ailleurs, les résultats démontrent que même lorsque les débits de ventilation sont très bas et que la DC est de 200 %, la concentration en CO₂ tend vers 400 ppm. Cela n'est pas un résultat attendu, puisque dans ce contexte, la concentration en CO₂ devrait plutôt diminuer à cause de la photosynthèse des plantes. Puisque le bilan de croissance doit être revu, cela corrigera également le bilan en CO₂ du modèle de tomates.

Afin d'explorer la possibilité de récupérer l'air évacué du bâtiment pour alimenter l'eAIB, un bilan de CO₂ devra être effectué pour chaque zone en fonction de l'occupation. De plus, d'autres améliorations pourront être apportées au modèle de tomates afin qu'il soit plus versatile :

- Ajouter un système d'enrichissement de CO₂ ;
- Effectuer un traitement des gains solaires absorbés par les surfaces en fonction de la superficie cultivée tel que réalisé par (Kokogiannakis & Cooper, 2015). En effet, une partie des gains solaires transmis aux surfaces sont en fait interceptés par les plantes (ASHRAE, 2011) ;
- Ajouter une période sombre (durée et horaire) ;
- Revoir la méthode de résolution au sein du code du modèle de tomates pour qu'il soit possible d'effectuer les simulations plus rapidement c.-à-d. avec un pas de temps plus élevé qu'une seconde.

5.2.2 Modèle de laitues de Graamans et al. (2017)

La deuxième étude a également permis d'évaluer les performances du modèle de laitues. Celui-ci n'a pas eu besoin d'être modifié puisqu'il était adapté au contexte de l'étude. Certaines améliorations pourront être apportées au modèle afin d'améliorer sa versatilité :

- Créer une composante de laitues sur mesure dans TRNSYS. Dans le cadre de cette recherche, le modèle était indépendant et a été couplé manuellement. Cela permettra entre autres d'effectuer des simulations annuelles pour lesquels l'eAIB variera entre deux états (photopériode et période obscure) et d'évaluer les performances de systèmes CVCA par exemple. Cette fonction simplifie également l'usage du modèle de laitues ;
- Modifier le modèle pour inclure l'éclairage naturel en plus de l'éclairage artificiel. Le modèle devra par contre être validé en éclairage naturel, car l'une des conditions environnementales intérieures, soit l'énergie lumineuse absorbée par les laitues, ne sera plus constante ;
- Inclure une estimation du CO₂ consommé par les laitues ;
- Inclure une estimation de la production agricole ;
- Élargir les plages de fonctionnalité du modèle afin d'évaluer l'impact de laitues lorsqu'elles sont incluses à basse densité dans un espace occupé ayant un faible taux d'humidité et de CO₂.

CONCLUSION

Une approche pour estimer l'impact des plantes sur les charges d'un eAIB selon les conditions de conception a été développée. Pour y parvenir, l'impact des plantes sur les charges a été évalué dans une première étude paramétrique exploratoire. L'approche a ensuite été développée selon laquelle certains paramètres de plantes ont été proposés pour inclure les flux de chaleur sensible et latente des plantes pour estimer les charges maximales selon les conditions de conception. L'impact des plantes sur les charges maximales pour les conditions de conception pour un cas général d'eAIB en climat froid a été évalué dans une deuxième étude paramétrique. Seules les charges maximales de chauffage sensible et de refroidissement latent ont été estimées puisque la transpiration et l'effet de refroidissement des plantes n'ont pas besoin d'être considérés pour le calcul de la charge maximale de refroidissement sensible, et ce, peu importe l'emplacement du bâtiment. Pour cette deuxième étude paramétrique, différents scénarios de croissance pouvant être choisis par les producteurs ont été étudiés. Les charges maximales de chauffage sensible estimées ont montré l'importance de l'effet de refroidissement des plantes, ce qui pourrait influencer le dimensionnement du système de chauffage lorsque comparé au cas où l'impact des plantes n'est pas considéré. Les charges maximales de refroidissement latent ont montré théoriquement qu'à cause de la transpiration des plantes, l'ajout d'un système de déshumidification est justifié afin de maintenir les conditions intérieures. Les résultats pour les différents scénarios ont également montré que certains paramètres (LAI, densité de culture et points de consigne (température et humidité)) avaient une influence significative sur les charges maximales de chauffage sensible et de refroidissement latent, comme par exemple, la présence ou l'absence de période obscure dans le cycle de croissance des plantes. Ces paramètres sont généralement déterminés par les producteurs selon des méthodes d'horticulture et certains ont montrés avoir plus d'influence que d'autres sur les charges maximales estimées.

L'approche développée permet également aux concepteurs de systèmes de prédire le comportement énergétique d'un eAIB afin de favoriser les échanges avec les producteurs et ainsi optimiser la balance entre les performances des systèmes CVCA (consommation

énergétique, appel de puissance, maintien des conditions environnementales intérieures) et la productivité agricole de qualité selon des critères économiques, sociaux et environnementaux. Les flux de chaleur sensible et latent fournis en ANNEXE IV peuvent être utilisés directement pour chiffrer les gains internes des plantes au sein d'un modèle d'espace d'agriculture défini selon certaines limites afin d'estimer les charges. Cependant, il s'agit d'une approche d'estimation des charges seulement, une approche validée pour calculer les charges de conception d'un eAIB qui inclut les plantes à titre de gains internes n'a pas encore été développée.

Les travaux futurs consisteront à améliorer les outils de modélisation afin d'effectuer des simulations annuelles, pour par exemple, évaluer les performances de systèmes CVCA. En plus d'effectuer certaines modifications aux modèles de tomates et de laitues pour améliorer leur versatilité, certaines modifications pourraient être effectuées sur le modèle TRNSYS :

- Modifier la composante de déshumidification engendrée par le refroidissement sensible de l'air (*Type 2280*) ;
- Ajouter une masse de solution hydroponique selon la densité de culture afin d'inclure son effet de stockage thermique ;
- Une étude de CFD pourra être faite au sein d'un eAIB afin de déterminer les coefficients de convection h pour les murs et plafond qui considèrent l'utilisation de ventilateurs situés dans l'eAIB et nécessaires à la productivité agricole. De cette étude, une composante TRNSYS pourra être créée.

Plus largement, cette étude pourra contribuer au développement d'un standard afin d'inclure les plantes à titre de gains internes lors du calcul des charges, qui est l'une des étapes essentielles au dimensionnement des systèmes CVCA. Pour y parvenir, les gains internes des plantes à considérer devront être déterminés selon une approche validée et basé sur des simplifications acceptables des flux de chaleur induits par les plantes.

ANNEXE I

DÉTAIL DE LA CONSTRUCTION DES MURS, PLAFOND, PLANCHER, TOIT ET DALLE

Le bâtiment modélisé représente le cas d'un bâtiment situé à Montréal de type industriel rénové. Les compositions des murs, planchers et plafonds du bâtiment utilisées dans ce mémoire sont présentées au Tableau-A I-1.

Tableau-A I-1 Compositions des murs, planchers et plafonds du bâtiment

	Matériau	Résistance thermique (m²K/W)	Conductivité (W/mK)	Épaisseur (m)	Densité (kg/m³)	Chaleur spécifique (J/kgK)	Absorbance solaire (-)	SHGC (-)	
Mur extérieur	Brique	0,25	0,405	0,1016	1121,29	790	0,7		
	Structure	0,37							0,7
	Espace d’air	0,15							
	Gypse	0,12	0,16	0,019	800	1090	0,4		
	Total	RSI = 0.89 (R =4.95)							
Dalle	Béton	0,08	1,311	0,1016	2240	836,8	0,85		
	Revêtement	0,1					0,8		
	Total	RSI = 0.18 (R = 1.02)							
Toiture	Membrane	0,06	0,16	0,0095	1121,29	1460	0,7		
	Isolant	5,37	0,049	0,263	836,8	265	0,7		
	Structure	0	45,006	0,0015	418,4	7680	0,6		
	Total	RSI = 5.43 (R = 30.83)							
Fenêtres	Extraweiss6 mm	0,18						0,894	
Plafond intérieur	Bétom	0,19	0,53	0,1016	1280	840	0,5		
Plancher intérieur	Béton	0,19	0,53	0,1016	1280	840	0,5		
Mur intérieur	Gypse	0,12	0,16	0,019	800	1090	0,4		
	Espace d’air	0,15							
	Gypse	0,12	0,16	0,019	800	1090	0,4		

ANNEXE II

VÉRIFICATION DU CALCUL DES CHARGES D'UNE ZONE INTERNE SOUS LES CONDITIONS DE CONCEPTION DANS TRNSYS

Le bâtiment de la deuxième étude paramétrique est modélisé au sein de TRNBuild et les conditions de conception pour effectuer le dimensionnement des systèmes CVCA sont assignées manuellement. Les conditions de conception sont les données climatiques selon ASHRAE (2013a) ainsi que les points de consignes et les gains internes à considérer selon un horaire définis dans la norme ASHRAE 90.1-2010 (ASHRAE, 2010a).

Afin de vérifier que les conditions de conception sont assignées correctement, les résultats obtenus pour une zone thermique intérieure (tel que l'eAIB) avec TRNSYS sont comparés à ceux obtenus avec OpenStudio, une interface d'EnergyPlus qui effectue automatiquement le calcul des charges sensible de chauffage et de refroidissement pour les conditions de conception.

Cette vérification a été effectuée à l'aide d'un bâtiment test modélisé dans TRNSYS et dans OpenStudio, sans systèmes CVCA, selon les mêmes paramètres (construction, gains internes, ventilation et infiltration, etc.). Le modèle TRNSYS a été ajusté afin de réduire l'écart avec OpenStudio au niveau des charges obtenues selon les données climatiques d'une année typique à Montréal. Pour les zones internes, les différences obtenues sont faibles pour une journée d'hiver et d'été tel que présenté respectivement par les Figure-A II-1 et Figure-A II-2.

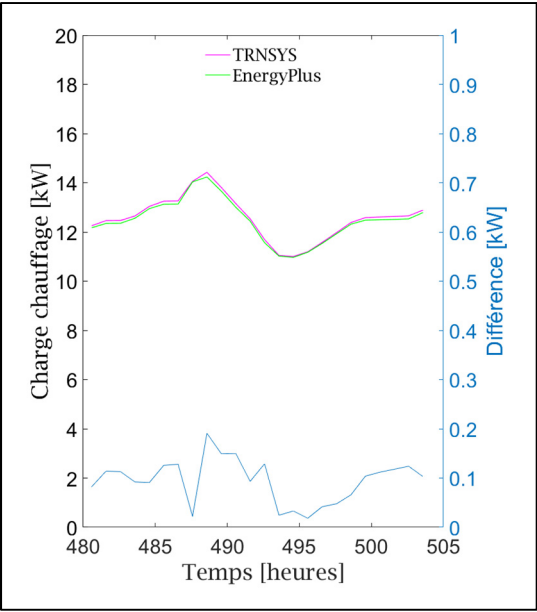


Figure-A II-1 Charge de chauffage sensible pour le 21 janvier

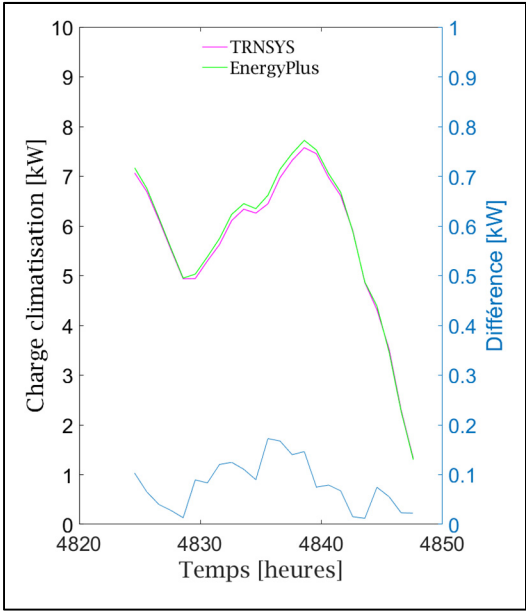


Figure-A II-2 Charge de refroidissement sensible pour le 21 juillet

Une fois cette première vérification effectuée, les conditions de conception ont été assignées manuellement. Pour les conditions extérieures, les jours de conception sélectionnés correspondent aux données climatiques à 0,4 % en refroidissement et à 99,6 % en chauffage. Les profils de température présentés à la Figure 4.4 ont été déterminés selon ASHRAE (2013a). En chauffage, les conditions extérieures sont maintenues constantes durant trois jours aux valeurs de conception (Spitler, 2014). Alors qu'en refroidissement, les profils de température bulbe sec et bulbe humide sont déterminées à partir des conditions climatiques de conception et calculées pour chaque heure à partir de l'équation (II-1) (ASHRAE, 2013a):

$$T_i = T_{max} + f_i \cdot DR \quad (II-1)$$

où

T : Température de l'air, °C ;

T_{max} : Température maximale de conception, °C ;

DR : Intervalle journalier de conception, °C ;

f : Fraction de l'intervalle de température ;

i : Heure de la journée de conception (de 1 à 24).

Le fichier météorologique pour une année typique fournit par le CWEC (*CAN_PQ_Montreal.Intl.AP.716270_CWEC.epw*) est utilisé en entrée du modèle TRNSYS est ensuite modifié selon les conditions extérieures des jours de conception pour le 19, 20 et 21 janvier pour le jour de conception en chauffage et pour le 21 juillet pour le jour de conception en refroidissement.

Pour les conditions intérieures, les points de consignes tel qu'illustrés à la Figure-A II-3 et les horaires des gains à considérer sont assignés selon la norme ASHRAE 90.1-2010 pour les jours d'hiver et pour le jour d'été. En chauffage, aucun gain interne n'est considéré alors qu'en refroidissement tous les gains internes sont considérés en tout temps.

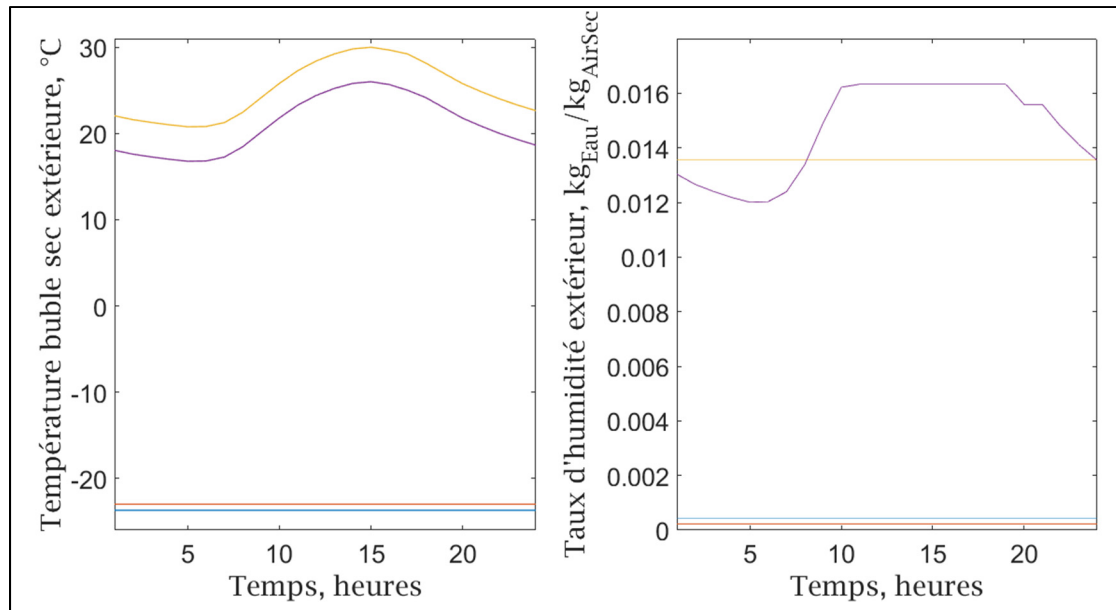


Figure-A II-3 Points de consigne pour
des espaces de bureaux
selon la norme ASHRAE 90.1

Pour obtenir les charges de chauffage et de refroidissement de la zone interne à l'étude sous TRNSYS, deux simulations distinctes sont effectuées pour les jours d'hiver et pour le jour d'été. Les résultats sont obtenus et traités à l'aide de MATLAB afin de prélever les charges maximales atteintes en chauffage et en refroidissement.

Pour obtenir les charges de chauffage et de refroidissement de la zone interne à l'étude dans OpenStudio, les charges maximales pour les jours de conception à l'étude sont prélevées dans les résultats présentées dans le sous-programme de visualisation DView.

Les écarts obtenus entre les charges de chauffage et de refroidissement sont de 0,7 % et 3,3 % respectivement. Ces écarts obtenus sont acceptables et l'assignation manuelle des conditions de conception dans le logiciel TRNSYS est correcte. Cette approche peut donc être utilisée pour estimer les charges maximales de l'eAIB, soit une zone interne, pour la deuxième étude paramétrique de ce mémoire.

ANNEXE III

CODES DES MODÈLES DE PLANTES

Modèle de tomates

Le modèle de tomates a été développé dans le langage FORTRAN 90 par Ward et al. (2015) et celui-ci a été modifié (en gras) pour les besoins de l'étude d'un eAIB.

```
SUBROUTINE TYPE203
    USE TrnsysFunctions !Access to helpful trnsys functions to interface with the simulation
    USE TrnsysConstants
    USE PlantConstants !Defines all the constants to do with the plants - data for tomatoes
    used
    !DEC$ATTRIBUTES DLLEXPORT :: TYPE 203
    !-----

    !Type 203 developed at Cambridge University Engineering Department
    !Written by Chris Cundy using work developed by R. Choudhary et al.

    !Local variable declarations

    IMPLICIT NONE

    !Inputs
    DOUBLE PRECISION A_gr      !Area of greenhouse floor m2
    DOUBLE PRECISION V        !Volume of the greenhouse, m3
    !DOUBLE PRECISION QLATG !Latent Energy gain, used to work out change in RH, kJ/hr
    Double Precision AH_i      !Internal Absolute humidity, kg d'eau/kg dair
    Double Precision T_amb      !External temp degC
    DOUBLE PRECISION T_sky      !Sky temp degC
    DOUBLE PRECISION T_i        !Internal air temperature degC
    DOUBLE PRECISION RH_ext      !Relative humidity outside the greenhouse
    DOUBLE PRECISION Air_Change_Inf !The air changes per hour due to infiltration /hr
    !DOUBLE PRECISION Vent_Gains !The gains to the greenhouse due to ventilation
    DOUBLE PRECISION Vent_Gains !Airchange due to ventilation /hr !MODIFICATION MHT 12-2017
    DOUBLE PRECISION QSOL_TR !Visible light power transmitted to the inside of the airzone

    !Outputs
    DOUBLE PRECISION T_v        !Vegetation temperature (K in code but stored as DegC in array
    for comparability)
    DOUBLE PRECISION bidon      !Internal water content of air kg/m3
    !DOUBLE PRECISION C_w !Internal water content of air kg/m3
```

```

!DOUBLE PRECISION AH      !Humidity ratio kg water / kg dry air
DOUBLE PRECISION LAI      !Lead area index
!DOUBLE PRECISION RH_i    !Relative humidity inside the greenhouse
DOUBLE PRECISION AH_gain   !Absolute humidity gain/loss from the plants [kg d'eau/hr]
!MHT 01-2018
DOUBLE PRECISION Air_gain !Gain to air from vegetation
DOUBLE PRECISION c_ppm    !Carbon dioxide concentration in ppm

!Greenhouse state
!These are stored in a local array, which also holds T_v, C_w
DOUBLE PRECISION C_c !Density of carbon dioxide [kg/m3]
DOUBLE PRECISION C_buf ! Mass of carbohydrate in buffer per unit area of cultivated floor
[kg/m^2]
DOUBLE PRECISION C_fruit ! Mass of carbohydrate in fruit per unit area of cultivated
floor [kg/m^2]
DOUBLE PRECISION C_leaf ! Mass of carbohydrate in leaves per unit area of cultivated
floor [kg/m^2]
DOUBLE PRECISION C_stem ! Mass of carbohydrate in stem per unit area of cultivated floor
[kg/m^2]
DOUBLE PRECISION R_fruit ! Relative growth rate of fruit averaged over 5 days [1/s]
DOUBLE PRECISION R_leaf ! Relative growth rate of leaf averaged over 5 days [1/s]
DOUBLE PRECISION R_stem ! Relative growth rate of stem averaged over 5 days [1/s]

!Parameters

DOUBLE PRECISION c_v      !Heat capacity of vegetation
DOUBLE PRECISION k_v      !Attenuation coefficient
DOUBLE PRECISION k_l      !Extinction coefficient
DOUBLE PRECISION rho_v    !Far-IR reflectance of vegetation
DOUBLE PRECISION eps_v    !Far-IR emittance of vegetation
DOUBLE PRECISION rhoS_v   !Solar reflectance of vegetation
DOUBLE PRECISION d_v      !Characteristic leaf length
DOUBLE PRECISION p_v      !Cultivated fraction of floor
DOUBLE PRECISION msd_v    !Mass surface density
DOUBLE PRECISION cd_c     !Specific heat capacity per unit area
DOUBLE PRECISION P_al     !Power of artificial lights

!TRNSYS-derived
DOUBLE PRECISION Time !Simulation time
DOUBLE PRECISION Timestep !Simulation timestep

!Variables
DOUBLE PRECISION C_w !Internal water content of air kg/m3 !MHT
DOUBLE PRECISION AH_gain_s !kg d'eau par m^3 for a timestep !MHT

```

```

DOUBLE PRECISION H      !Height of a storey
DOUBLE PRECISION Cp      !Static pressure coefficient - see Awbi, ch3, table 3.2
DOUBLE PRECISION Cd      !Sharp edge orifice, Awbi
DOUBLE PRECISION Gr      !Used in V/P calculations
DOUBLE PRECISION Re      !Used in V/P calculatins
DOUBLE PRECISION HeavyG   !Used in V/P calculations
DOUBLE PRECISION Nu_G     !Used in VP calculations
DOUBLE PRECISION Heavy_si !Used in VP calculations
DOUBLE PRECISION Heavy_vi !Used in VP calculations
DOUBLE PRECISION Nu_R     !Used in VP calculations
DOUBLE PRECISION QV_v_i   !Convective heat transfer from veg to air
DOUBLE PRECISION HV       !Used in both transpiration and convective term
DOUBLE PRECISION QR_v_sky !Radiative heat from veg to sky
DOUBLE PRECISION QR_v_c   !Radiative heat from veg to cover
DOUBLE PRECISION QR_s_c   !Radiative heat from soil to cover
DOUBLE PRECISION QR_s_sky !Radiative heat from sky to cover
DOUBLE PRECISION qS_int   !Internal solar+art radiation flux (W/m2)
DOUBLE PRECISION qS_int_sun !Internal solar radiation flux (W/m2)
DOUBLE PRECISION tauS_v   !Used in the radiation calculations
DOUBLE PRECISION alphS_v  !Used in the radiation calculations
DOUBLE PRECISION xa       !Ratio of moisture content of air
DOUBLE PRECISION xv       !Used in transpiration calculations
DOUBLE PRECISION vpd      !Vapour pressure deficit
DOUBLE PRECISION tryvalue !Used in transpiration calculations
DOUBLE PRECISION r_st_JB  !Used in transpiration calculations
DOUBLE PRECISION CO2      !Carbon dioxide concentration, ppm
DOUBLE PRECISION x        !Used in transpiration calculations
DOUBLE PRECISION A_s      !Absorption coefficient for shortwave radiation
DOUBLE PRECISION I_s_bar  !Mean irradiation interacting with leaf surface
DOUBLE PRECISION Heavy_CO2 !Unsure if I'll keep this in atm
DOUBLE PRECISION r_i_CO2
DOUBLE PRECISION Heavy_vpd
DOUBLE PRECISION r_i_vpd
DOUBLE PRECISION r_st_S
DOUBLE PRECISION r_st
DOUBLE PRECISION r_st_hourly
DOUBLE PRECISION hL_v_i
DOUBLE PRECISION QTr_v_i !Transpirative gains to the air from veg
DOUBLE PRECISION C_e      !External air water content
DOUBLE PRECISION dC_w_dt  !Rate of change of internal water content
DOUBLE PRECISION dT_v_dt  !Rate of change of veg temp
DOUBLE PRECISION air_dens !Density of air kg/m3
DOUBLE PRECISION compvalue
DOUBLE PRECISION SATCONC !Function to calculate saturated water mass at a particular temp
DOUBLE PRECISION p_w      !Partial pressure of water
DOUBLE PRECISION rho_i    !Density of the internal air

```

```

DOUBLE PRECISION a_v !Effective area of vegetation
DOUBLE PRECISION flow_inf !Airflow due to infiltration [m^3/s]
DOUBLE PRECISION flow_vent !Airflow due to ventilation [m^3/s]
DOUBLE PRECISION R_a !Replacement of greenhouse air volume per second
DOUBLE PRECISION MC_i_e !Mass of c02 exchanged with the outside per second
DOUBLE PRECISION C_ce !External density of c02
!DOUBLE PRECISION LAI !Leaf Area Index
DOUBLE PRECISION QS_al_VIS !Visible light power from the artificial lights
DOUBLE PRECISION QS_int_fVIS ! Internal diffuse heat to the veg
DOUBLE PRECISION QS_tot_fVIS !Total diffuse heat to the veg
DOUBLE PRECISION K_fVIS !Visible diffuse extinction coefficient
DOUBLE PRECISION A_v_fVIS !Visible diffuse absorption coefficient
DOUBLE PRECISION QS_v_fVIS !Total heat to the veg from visible diffuse radiation
DOUBLE PRECISION QS_v_VIS !Total visible heat to the veg
DOUBLE PRECISION a_v_short !Absorption for shortwave radiation
DOUBLE PRECISION r_i_c02 !Used in transpiration
DOUBLE PRECISION c_c_ppm !CO2 concentration in ppm
DOUBLE PRECISION QT_v_i !Transpiration gain to air from veg
DOUBLE PRECISION T_25 !298K
DOUBLE PRECISION PAR ! The number of moles of photosynthetically active photons per unit
area of cultivated floor [mol[phot]/m^2s]
DOUBLE PRECISION Gamma ! The CO2 compensation point [mol[CO2]/mol(Ainsworth & Rogers)]
DOUBLE PRECISION H_airbuf_buf !Used in photosynthesis
DOUBLE PRECISION C_stom ! Stomatal CO2 concentration [mol[CO2]/mol(Ainsworth & Rogers)]
DOUBLE PRECISION J_pot !Used in photosynthesis
DOUBLE PRECISION J
DOUBLE PRECISION P
DOUBLE PRECISION Resp !Photorespiration rate
DOUBLE PRECISION MC_i_buf !Net photosynthesis rate
DOUBLE PRECISION C_buf_min !All these are used in carbohydrate flow
DOUBLE PRECISION H_buforg_buf
DOUBLE PRECISION H_t_v
DOUBLE PRECISION H_t_v24
DOUBLE PRECISION T_vmean
DOUBLE PRECISION H_t_vsum
DOUBLE PRECISION T_vsum
DOUBLE PRECISION G_t_v24
DOUBLE PRECISION MC_buf_fruit
DOUBLE PRECISION MC_buf_leaf
DOUBLE PRECISION MC_buf_stem
DOUBLE PRECISION MC_buf_i
DOUBLE PRECISION MC_fruit_i
DOUBLE PRECISION MC_leaf_i
DOUBLE PRECISION MC_stem_i
DOUBLE PRECISION C_max_leaf
DOUBLE PRECISION MC_leaf_prune

```



```

DOUBLE PRECISION DC_C_DT !Change in c02 concentration with time
DOUBLE PRECISION DC_fruit_dt !Change in carbohydrate concentration in fruit with time
DOUBLE PRECISION DC_leaf_dt
DOUBLE PRECISION DC_stem_dt
DOUBLE PRECISION DC_buf_dt
DOUBLE PRECISION DR_fruit_dt
DOUBLE PRECISION DR_leaf_dt
DOUBLE PRECISION DR_stem_dt
DOUBLE PRECISION DC_fruit
DOUBLE PRECISION T_vfinal !Correction MHT

INTEGER INFO(15) !Info array carrying information about the simulation
LOGICAL isStartTime !Boolean - needed for a hack around a failure of isStartTime to work
DOUBLE PRECISION test !For testing

Time = getSimulationTime()
Timestep = getSimulationTimeStep()

!-----
!Set the Version Number for this Type
  IF (getIsVersionSigningTime()) THEN
    CALL SetTypeVersion(17)
    RETURN
  ENDIF

!-----
  !IF (getIsLastCallofSimulation()) THEN
    !RETURN
  !ENDIF

!-----
!!Perform any "End of time step" manipulations that may be required
  ! TRNSYS suggests using tempLogical =getIsEndOfTimestep()
  !This keeps throwing errors when I try to use it, hence is not used atm.
  !Instead we use the info array, which is techically deprecated
  IF (INFO(13).EQ.1) THEN
    RETURN
  ENDIF

!-----
!Perform first call operations
  IF (getIsFirstCallofSimulation()) THEN
    CALL setNumberOfParameters(11)
    CALL setNumberOfInputs(10)

```

```

CALL setNumberOfDerivatives(0)
CALL setNumberOfOutputs(6)
CALL setIterationMode(1)
CALL setNumberStoredVariables(0,10) !Use this to store the state vector of the
greenhouse

```

```

CALL setInputUnits(1, 'AR1') !A_gr, m2
CALL setInputUnits(2, 'VL1') !Vm m3
!CALL setInputUnits(3, 'PW1') !QLATG, KJ/hr
CALL setInputUnits(3, 'DM1') ! AH_i, kg water / kg dry air
CALL setInputUnits(4, 'TE1') !T_amb, degC
CALL setInputUnits(5, 'TE1') !T_sky, degC
CALL setInputUnits(6, 'TE1') !T_i, degC
CALL setInputUnits(7, 'PC1') !RH_ext, %
CALL setInputUnits(8, 'DM1') !Air_Change_inf, -
CALL setInputUnits(9, 'PW1') !Vent_Gains, KJ/hr
CALL setInputUnits(10, 'PW1') !QSOL_TR, KJ/hr

```

```

CALL setOutputUnits(1, 'PW1') !Air_Gain, KJ/hr
CALL setOutputUnits(2, 'TE1') !T_v, degC
!CALL setOutputUnits(3, 'DN1') !C_w, kg water/m3 air
CALL setOutputUnits(3, 'DN1') !Output bidon
!CALL setOutputUnits(4, 'DM1') ! AH, kg water / kg dry air
CALL setOutputUnits(4, 'DM1') ! LAI, Leaf area/Cultivated area
!CALL setOutputUnits(5, 'PC1') !RH_i, %
CALL setOutputUnits(5, 'DM1') !AH_gain, kg d'eau/hr
CALL setOutputUnits(6, 'DM1') !C_ppm, ppm

```

```

IsStartTime = .TRUE.

```

```

RETURN
ENDIF

```

```

!-----
!Note there seems to be a bug here - I can't get IVF to recognize the presence of getIsStartTime
!as a function supplied in the trnsys .mod files. So I use this flag - Version signing time is
the
!very-first-ever call from trnsys, the next call is StartTime.
!First call of the simulation, time is equal to start time.
IF (isStartTime) THEN
  c_v = getParameterValue(1) ! Veg specific heat capacity
  k_l = getParameterValue(2) ! Veg long-wave extinction coefficient

```

```

rho_v = getParameterValue(3) ! Veg far-IR reflectance
eps_v = getParameterValue(4) ! Veg far-IR emittance
rhoS_v = getParameterValue(5) !Veg solar reflectance
d_v = getParameterValue(6) ! Veg characteristic leaf length
SLA = getParameterValue(7) ! Veg specific leaf area index
p_v = getParameterValue(8) ! Cultivated fraction of floor
msd_v = getParameterValue(9) ! Veg mass surface density
a_obs = getParameterValue(10) !Fraction of solar radiation in hitting obstructions
P_al = getParameterValue(11) !Total artificial light power supplied
!Use this call to read in parameters

```

```

!Here we validate the parameters somewhat
IF (c_v < 0.) CALL foundBadParameter(1, 'Fatal', &
'The heat capacity must be positive')
IF ((k_l < 0.) .or. (k_l > 1.)) CALL foundBadParameter(2, 'Fatal', &
'The extinction coefficient must be between 0 and 1')
IF ((rho_v < 0.) .or. (rho_v > 1.)) CALL foundBadParameter(3, 'Fatal', &
'The far-IR reflectance coefficient must be between 0 and 1')
IF ((eps_v < 0.) .or. (rho_v > 1.)) CALL foundBadParameter(4, 'Fatal', &
'The far-IR emittance must be between 0 and 1')
IF ((rhoS_v < 0.) .or. (rhoS_v > 1.)) CALL foundBadParameter(5, 'Fatal', &
'The solar reflectance of the vegetation must be between 0 and 1')
IF (d_v < 0.) CALL foundBadParameter(6, 'Fatal', &
'The characteristic leaf length must be greater than 0')
IF (SLA < 0.) CALL foundBadParameter(7, 'Fatal', &
'The specific leaf area index must be greater than 0')
IF (p_v < 0.) CALL foundBadParameter(8, 'Fatal', & !MHT pour étagères
'The cultivated fraction of the floor must be greater than 0') !MHT pour étagères
!IF ((p_v < 0.) .or. (p_v > 1.)) CALL foundBadParameter(8, 'Fatal', &
!'The cultivated fraction of the floor must be between 0 and 1')
IF (msd_v < 0.) CALL foundBadParameter(9, 'Fatal', &
'The vegetation mass surface density must be greater than 0')
IF ((a_obs < 0.) .or. (a_obs > 1.)) CALL foundBadParameter(10, 'Fatal', &
'The obstruction fraction must be between 0 and 1')
IF ((P_al < 0.)) CALL foundBadParameter(11, 'Fatal', &
'The light power must be greater than 0')
IF (ErrorFound()) RETURN

```

!Also here we would allocate memory for the variables that need it

```

!Set the initial values of the outputs
CALL setOutputValue(1, 0.d0) !Air Gain
!CALL setOutputValue(2, T_amb) !T_v
CALL setOutputValue(2, 21.0d0) !T_v      !Correction MHT 12-2017

```

```

!CALL setOutputValue(3, T_amb/ (100.0d0 * SATCONC(T_amb + T_k))) !C_w
CALL setOutputValue(3, 21.0d0/ (100.0d0 * SATCONC(21.0d0 + T_k))) !Correction MHT 12-2017
!CALL setOutputValue(4, T_amb / (100.d0 * SATCONC(T_amb + T_k) * 1.25d0)) !AH_i
CALL setOutputValue(4, 0.5d0) !LAI !Correction MHT 1-2018
!CALL setOutputValue(5, RH_ext) !RH_i
CALL setOutputValue(5, 0.001d0) !AH_gain !Correction MHT
CALL setOutputValue(6, 400.0d0) !C_ppm

!Set the initial values for the greenhouse state
!CALL setDynamicArrayValueThisIteration(1, T_amb)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(1, 21.0d0)!T_v !Correction MHT 12-2017
!CALL setDynamicArrayValueThisIteration(2, T_amb/ (100.0d0 * SATCONC(T_amb + T_k)))
!CALL setDynamicArrayValueThisIteration(3, 4d-4*M_c*atm/(R*(T_amb + T_k)))
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(3,7.29939d-4) !Correction MHT 01-2018 7.29939d-4
est la concentration CO2 de 400 ppm à 21degC
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(4, 0.001d0)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(5, 0.001d0)
!CALL setDynamicArrayValueThisIteration(6, 0.001d0)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(6, 0.5d0/SLA) ! Pour commencer à un LAI de 0.5
MHT 01-2018
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(7, 0.001d0)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(8, 0.d0)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(9, 0.d0)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(10, 0.d0)

isStartTime = .FALSE.

RETURN
ENDIF

!-----
!If there are multiple units of this type in the simulation we need to re-read the
!Parameters into the system
IF (getIsReReadParameters()) THEN
c_v = getParameterValue(1) ! Veg specific heat capacity!
k_l = getParameterValue(2) ! Veg long-wave extinction coefficient
rho_v = getParameterValue(3) ! Veg far-IR reflectance!
eps_v = getParameterValue(4) ! Veg far-IR emittance!
rhoS_v = getParameterValue(5) !Veg solar reflectance
d_v = getParameterValue(6) ! Veg characteristic leaf length!
SLA = getParameterValue(7) ! Veg specific leaf area index
p_v = getParameterValue(8) ! Cultivated fraction of floor!
msd_v = getParameterValue(9) ! Veg mass surface density!
a_obs = getParameterValue(10) !Fraction of solar radiation in hitting obstructions
P_al = getParameterValue(11) !Total artificial light power supplied
ENDIF

```

```

!=====
!-----
!This is the part that is called during a normal timestep
!First, retrieve any values

      T_v = getDynamicArrayValueLastTimestep(1)+T_k !T_v stored in array as degC
      !C_w = GetDynamicArrayValueLastTimestep(2)
      C_c =GetDynamicArrayValueLastTimestep(3)
      C_buf =GetDynamicArrayValueLastTimestep(4)
      C_fruit =GetDynamicArrayValueLastTimestep(5)
      C_leaf =GetDynamicArrayValueLastTimestep(6)
      C_stem =GetDynamicArrayValueLastTimestep(7)
      R_fruit = GetDynamicArrayValueLastTimestep(8)
      R_leaf = GetDynamicArrayValueLastTimestep(9)
      R_stem = GetDynamicArrayValueLastTimestep(10)

!Get the current inputs to the model
      A_gr = getInputValue(1)
      V = getInputValue(2)
      !QLATG = getInputValue(3)
      AH_i = getInputValue(3)
      T_amb = getInputValue(4)+T_k
      T_sky = getInputValue(5)+T_k
      T_i = getInputValue(6)+T_k
      RH_ext = getInputValue(7)
      Air_Change_inf = getInputValue(8)
      Vent_Gains = getInputValue(9)
      QSOL_tr = getInputValue(10)

      !Try to catch all the bad inputs we can
      IF (A_gr < 0.) CALL foundBadInput(1, 'Fatal', &
        'The input greenhouse area cannot be negative')
      IF (V < 0.) CALL foundBadInput(2, 'Fatal', &
        'The input greenhouse volume cannot be negative')
      IF (T_amb < 0.) CALL foundBadInput(4, 'Fatal', &
        'The input temperature is less than 0k')
      IF (T_i < 0.) CALL foundBadInput(5, 'Fatal', &
        'The input temperature is less than 0k')
      IF (T_amb < 0.) CALL foundBadInput(6, 'Fatal', &
        'The input temperature is less than 0k')
      IF ((RH_ext > 100.) .or. (RH_ext < 0.)) CALL foundBadInput(7, 'Fatal', &
        'The outside relative humidity must be between 0 and 100')
      IF (ErrorFound() ) RETURN

```

```

!-----
!Get some derived values

!C_ce = 4.0d0-4.0d0*M_c*atm/(R*T_amb); ! External carbon dioxide concentration [kg/m^3]
!MHT :Pourquoi faire une soustraction ? !400 ppm = 0.4 kg/m^3
C_ce =400.0d0*0.1204d0*44.0d0*atm/(21.0d0+T_k)/1d9;! C_ce_ppm = 400 ppm !Formule ASHRAE
Fundamentals / Air contaminants !MHT 01-2018
air_dens = -0.0046d0*(T_i - T_k) + 1.2978d0 !Density of air kg/m3 !MHT 2018
C_w = AH_i*air_dens !MHT 01-2018

p_w = C_w*R*(T_i/M_w) !Partial pressure of water
rho_i = ((atm - p_w) * M_a + p_w*M_w) / (R*T_i) !Density of air
LAI = SLA*C_leaf !Leaf Area Index
!A_v = A_gr*p_v*(1 - EXP(-k_l*LAI)) ! Effective area of vegetation [m^2] %
ARE YOU SURE YOU UNDERSTAND THE EXPONENTIAL HERE? !D'où vient cette formule? Voir celle de Tei
et al. (1996) utilisée par Graamans (2017) MHT 01-2018

!A_v = LAI * A_gr * p_v !MHT 01-2018
!LAIs = 1/k*(1 - EXP(-k*LAI)) !Présenté dans Tei et al. (1996) provenant de Lemeur and
Blad (1974). ! LAIs = LAI effective !MHT 01-2018

A_v = A_gr*p_v*1/k_l*(1 - EXP(-k_l*LAI)) ! Effective area of vegetation [m^2] !For
transpiration calculation !MHT 01-2018

C_c_ppm = C_c*R*T_i/(M_c*atm)*1d6 ! CO2 concentration in ppm

!-----
!V/P: Convection/phase change

!Vegetation to internal air
Gr = (158.0d0*(d_v*100.0d0) ** 3) * ABS(T_v- T_i)
Re = IntAirSpeed*d_s / 151.0d-7
HeavyG = 5.0d-1 + 5.0d-1*TANH(1000.0d0*(1.0d-5 - Gr))
Nu_G = (1.0d0 - HeavyG) * (13.0d-1 ** 33.0d-2) + HeavyG*(5.0d-1*Gr**25.0d-2)
Heavy_vi = 5.0d-1+5.0d-1*TANH(1000.0d0*(2.0d-4 - Re))
Nu_R=(59.0d-2 * SQRT(Re))*Heavy_si + (32.0d-3 * (Re**0.8)) &
* (1-Heavy_vi)
Nu = MAX(Nu_G, Nu_R)

QV_v_i = A_gr * 2.0d0 * p_v * LAI * Nu * 0.025d0 * (T_v -T_i) &
/d_v
HV = Nu * 0.025d0 / d_v

!-----

```

```

!Air exchange, handled entirely within TRNSYS
!using the airzone infiltration tools and possibly TRNFlow in the future
!but this raises problems with calculating the CO2 exchange: We can get the
!airchange rate from infiltration from the airzone type 56 output, but no similar output
!exists for ventilation. So we calculate this by taking the ventilation gain and
!working backward to calculate the airflow rate. This assumes that the exchange with
!the office building is negligible. This can be changed later

    !flow_inf = Air_change_inf * V / 3600.0d0 !Airflow, m^3/s
    flow_inf = Air_change_inf /3600.0d0 ! Convert from /h to /s !MHT

    !flow_vent = ABS((Vent_Gains / 3.6d0) / (rho_i * c_i * (T_amb - T_i) * 3600.0d0)) !Airflow,
m^3/s Need to divide by 3.6 to get in W

    flow_vent = Vent_Gains/3600.0d0 !Air change /h !Modif MHT 12-2017

    !R_a = (flow_vent + flow_inf)/V !Replacement of air /s

    R_a = (flow_vent + flow_inf)*V !Modif MHT 12-2017 !Airflow, m^3/s

    MC_i_e = R_a*(C_c - C_ce) !MHT kgCO2/s

!-----
!R: Far-Infrared Radiation
!At the moment we just want the infra-red from the veg to sky

    !QR_v_sky = A_gr*p_v*sigm*(eps_v)*((T_v)**4 &
    !- (T_sky) ** 4) / (1-rho_v*0.1d0)

    QR_v_sky = 0.0d0 !MHT 1-2018 À négliger (voir Graamans (2017))

!-----
!Solar Radiation
    Qs_int_sun = QSOL_TR / (A_gr * 36d-1) !Internal solar radiation, W/m2
    !Unfortunately TRNSYS doesn't discriminate between direct and diffuse
    !inside the building. We'll assume it's all diffuse for now, see where that gets us

    QS_tot_fVIS = Qs_int_sun !MHT Correction 1-2018 Sans cette ligne, il n'y a pas d'énergie
solaire qui entre dans le bilan

    Qs_int = Qs_int_sun+P_al*f_VIS/A_gr !MHT Correction 1-2018 Pour que la lumière
artificielle ait une influence sur r_st !Total W/m^2

    !Artificial Lighting power onto veg

```

```

    QS_al_VIS = f_VIS*P_al*p_v
    !f_VIS = 0.25 (défini dans PLANTCONSTANTS.f90) !MHT 01-2018 Ce qui correspond à
    l'efficacité d'une LED et d'un fluorescent

    QS_int_fVIS = QS_tot_fVIS * A_gr * p_v !Visible diffuse power onto the plants

    !Solar radiation absorbed by the vegetation
    k_fVIS = 0.85d0; !Visible diffuse extinction coefficient [-]
    a_v_fVIS = 0.95d0 - 0.9d0*EXP(-k_fVIS*LAI) ! Visible diffuse absorption coefficient [-]
    QS_v_fVIS = (QS_int_fVIS*(1.0d0 - a_obs) + QS_al_VIS)*a_v_fVIS
    QS_v_VIS = QS_v_fVIS

!-----
!Transpiration

    xa=C_w/rho_i !ratio of moisture content of air
    xv=SATCONC(T_v)/rho_i;
    vpd=atm*(xv/(xv+622.0d-4)-xa/(xa+622.0d-4)) !vapour pressure deficit

!Stomatal resistance according to Jolliet and Bailey

    !tryvalue=41.0d-3*(1.0d0-66.0d-3*(200.0d0/(qS_int/36.0d-1+200.0d0)) &
    ! - 22.0d-2*vpd) / 100.0d0
    !
    !IF (tryvalue > 0.0001) THEN
    !   r_st_JB = (1 / (41.0d-2*(1.0d0-66.0d-3*(200.0d0/(qS_int &
    !     / 36.0d-1 + 200.0d0))-22.0d-2*vpd)/100.0d0))+(1.0d0-compvalue) &
    !     * 1000.0d0
    !ELSE
    !   r_st_JB = 1000.0d0
    !ENDIF
    !

!Stomatal resistance according to Stanghellini

    x = EXP(-0.24d0*LAI);
    a_v_short = 0.83d0*(1.0d0 - 0.70d0*x)*(1.0d0 + 0.58d0*x**2)*(0.88d0 - x**2 +
    0.12d0*x*(8.0d0/3.0d0)); !Absorption for shortwave radiation
    I_s_bar = QS_int*a_v_short/(2.0d0*LAI) !Mean radiation interacting with leaf surface

    !IF (I_s_bar < 0.0d0) THEN
    !   !!r_i_CO2 = 0
    !   !r_i_CO2 = 1 !MHT 2018
    !ELSE

```



```

!!r_i_CO2 = 2.0d0 * 6.1d-7 * (C_c_ppm - 200.0d0) ** 2
!r_i_CO2 = 2.0d0 * 6.1d-7 * (C_c_ppm - 200.0d0) ** 2 !MHT 01-2018
!ENDIF

!Tel que présenté dans l'article Ward(2014) MHT 01-2018
IF (I_s_bar == 0.0d0) THEN
  r_i_CO2 = 1
ELSE
  IF (C_c_ppm < 1100.0d0) THEN
    r_i_CO2 = 1.0d0 + 6.1d-7 * (C_c_ppm - 200.0d0) ** 2
  ELSE
    r_i_CO2 = 1.5d0
  ENDIF
ENDIF

ENDIF

IF (vpd > 0.8d0) THEN
  r_i_vpd = 1.5d0
ELSE
  r_i_vpd = (1.0d0 + 4.3*vpd**2)
ENDIF

r_st_S = 82.0d0*((QS_int + 4.3d0)/(QS_int + 0.54d0))*(1.0d0 + 0.023d0*(T_v - T_k -
24.5d0)**2)*r_i_CO2*r_i_vpd
!MHT 2018 r_i_CO2=0 donc r_st = 0

r_st = r_st_S !Select transpiration equation to use
hL_v_i = 2.0d0*LAI*H_fg/(rho_i*c_i)*(Le**(2.0d0/3.0d0)/HV + r_st/(rho_i*c_i))**(-1)
QT_v_i = A_v*hL_v_i*(SATCONC(T_v) - C_w) !W
AH_gain = QT_v_i/H_fg*3600 !kg d'eau/hr
AH_gain_s = AH_gain*Timestep/V !kg d'eau/s si timestep=1/3600 / m^3 d'air MHT 01-2018

! PHOTOSYNTHESIS MODEL - VANTHOOR

! For now I'm considering photosynthetically active radiation to be visible
! radiation absorbed by the vegetation.
T_25 = T_k + 25.0d0;

PAR = (QS_v_VIS/(heat_phot*N_A))/(p_v*A_gr) ! The number of moles of photosynthetically
active photons per unit area of cultivated floor [mol{phot}/m^2s]
Gamma = c_Gamma*(T_v - T_k)/LAI + 20.0d0*c_Gamma*(1.0d0 - 1.0d0/LAI) ! The CO2
compensation point [mol{CO2}/mol(Ainsworth & Rogers)]
h_airbuf_buf = 1.0d0/(1.0d0 + EXP(s_airbuf_buf*(C_buf - C_buf_max)))

```

```

C_stom = eta*C_c_ppm*1.0d-6; ! Stomatal CO2 concentration [mol{CO2}/mol(Ainsworth &
Rogers)]

J_pot = LAI*J_max_25*EXP(E_j*(T_v - T_25)/(R*T_v*T_25))*(1.0d0 + EXP((S*T_25 -
HH)/(R*T_25)))/(1.0d0 + EXP((S*T_v - HH)/(R*T_v))) ! [mol{e}/m^2{floor}s]

J = (J_pot + alph*PAR - SQRT((J_pot + alph*PAR)**2 -
4*theta*J_pot*alph*PAR))/(2.0d0*theta)

P = J*(C_stom - Gamma)/(4.0d0*(C_stom + 2.0d0*Gamma)) !Photosynthesis rate [mol{CO2}/s]
%%% IS IT LEGITIMATE THAT THIS CAN BE NEGATIVE

Resp = P*Gamma/C_stom !Photorespiration rate

MC_i_buf = M_carb*h_airbuf_buf*(P - Resp) !The net photosynthesis rate
[kg{CH2O}/m^2{floor}/s]

! CROP GROWTH MODEL

! Flow of carbohydrates from buffer to fruit, leaves and stem

T_vmean = T_v !HACKHACK HACK REPLACE WITH 24-HOUR MEAN VEG TEMP
C_buf_min = 0.05d0*C_buf_max;
h_buforg_buf = 1.0d0/(1.0d0 + EXP(s_buforg_buf*(C_buf - C_buf_min)))
h_T_v = 1.0d0/(1.0d0 + EXP(s_min_T*(T_v - T_min_v)))/(1.0d0 + EXP(s_max_T*(T_v -
T_max_v)))
h_T_v24 = 1.0d0/(1.0d0 + exp(s_min_T24*(T_vmean - T_min_v24)))/(1.0d0 +
exp(s_max_T24*(T_vmean - T_max_v24)))

h_T_vsum = 0.5d0*(1.0d0 + sqrt((T_vsum/T_sum_end)**2.0d0 + 1d-4) - sqrt(((T_vsum -
T_sum_end)/T_sum_end)**2 + 1d-4))
g_T_v24 = 0.047d0*(T_vmean - T_k) + 0.06d0
!These are the non-differentiable forms of the above equations
!linear_low = (T_v - T_base_inst)/(T_optlow_inst - T_base_inst);
!linear_high = (T_max_inst - T_v)/(T_max_inst - T_opthigh_inst);
!h_T_v = min(min(max(linear_low, 0), max(linear_high, 0)), 1);
!linear_low = (T_v - T_base_24)/(T_optlow_24 - T_base_24);
!linear_high = (T_max_24 - T_v)/(T_max_24 - T_opthigh_24);
!h_T_v24 = min(min(max(linear_low, 0), max(linear_high, 0)), 1);
!h_T_vsum = max(0, min(1, T_vsum/T_sum_end));
MC_buf_fruit = h_buforg_buf*h_T_v*h_T_v24*h_T_vsum*g_T_v24*rg_fruit
MC_buf_leaf = h_buforg_buf*h_T_v24*g_T_v24*rg_leaf
MC_buf_stem = h_buforg_buf*h_T_v24*g_T_v24*rg_stem

!Growth respiration, which is CO2 leaving the buffer
MC_buf_i = c_fruit_g*MC_buf_fruit + c_leaf_g*MC_buf_leaf + c_stem_g*MC_buf_stem

```

```

!Maintenance respiration
    MC_fruit_i = c_fruit_m*Q_10**(0.1*(T_vmean - T_25))*C_fruit*(1 - exp(-c_RGR*R_fruit))
    MC_leaf_i = c_leaf_m*Q_10**(0.1*(T_vmean - T_25))*C_leaf*(1 - exp(-c_RGR*R_leaf))
    MC_stem_i = c_stem_m*Q_10**(0.1*(T_vmean - T_25))*C_stem*(1 - exp(-c_RGR*R_stem))
    C_max_leaf = LAI_max/SLA
    MC_leaf_prune = (C_leaf - C_max_leaf)/(1 + exp(s_prune*(C_leaf - C_max_leaf))) !THIS
DIFFERENTIABLE FORM DOESN'T WORK AT ALL!
    !MC_leaf_prune = max(C_leaf - C_max_leaf, 0);

!-----
!Heat and mass balances:

    Air_Gain = QV_v_i * 3.6d0 !Get into KJ/hr

    !dC_w_dt = (1 / (V * H_fg)) * (QT_v_i + QLATG)
    dC_c_dt = - MC_i_e + M_c/M_carb*(MC_buf_i + MC_fruit_i + MC_leaf_i + MC_stem_i -
MC_i_buf);
    dC_buf_dt = MC_i_buf - MC_buf_fruit - MC_buf_leaf - MC_buf_stem - MC_buf_i
    dC_fruit_dt = MC_buf_fruit - MC_fruit_i
    dC_leaf_dt = MC_buf_leaf - MC_leaf_i - MC_leaf_prune;
    dC_stem_dt = MC_buf_stem - MC_stem_i;
    dR_fruit_dt = 1/(86400.0d0*5.0d0)*(dC_fruit_dt/C_fruit - R_fruit);
    dR_leaf_dt = 1/(86400.0d0*5.0d0)*(dC_leaf_dt/C_leaf - R_leaf);
    dR_stem_dt = 1/(86400.0d0*5.0d0)*(dC_stem_dt/C_stem - R_stem);
    dT_v_dt = (1 / (p_v * c_v * msd_v * A_gr)) &
    * (-QV_v_i - QT_v_i + QS_v_VIS - QR_v_sky)

!-----
!Output
    !Timestep is in hours
    !Update state variables using Euler integration
    !In future could replace with a more advanced system
    !Though not sure how to square that with TRNSYS' integration
    T_vfinal = T_v + dT_v_dT * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
    !C_w = C_w + dC_w_dT * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
    C_c = C_c + dC_c_dT * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
    C_buf = C_buf + dC_buf_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
    C_fruit = C_fruit + dC_fruit_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
    C_leaf = C_leaf + dC_leaf_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
    C_stem = C_stem + dC_stem_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep

```

```

R_fruit = R_fruit + dR_fruit_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
R_leaf = R_leaf + dR_leaf_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep
R_stem = R_stem + dR_stem_dt * 60.0d0 * 60.0d0 * timestep

```

```

!Smooth out fluctuations - Occasionally the coarse time-step will cause
! C_w to jump to over SATCONC(T_i). If this happens then TRNSYS will abort
! with an error message. To stop this we have the following calculation.

```

```

!air_dens = -0.0046d0*(T_i - t_k) + 1.2978d0 !Density of air kg/m3

```

```

!IF(C_w > SATCONC(T_i))THEN
  !C_w = SATCONC(T_i) * 0.99d0
!ENDIF
!AH_i = C_w / air_dens
!RH_i = 100.0d0 * C_w / SATCONC(T_i)

```

```

! ! This Output just for testing:
!!=====
! CALL setOutputValue(1, 1)
! CALL setOutputValue(2, 10)
! CALL setOutputValue(3, 0.005)
! CALL setOutputValue(4, 0.004)
! CALL setOutputValue(5, 50)
! CALL setOutputValue(6, 380)
!!=====

```

```

CALL setOutputValue(1, Air_Gain)
CALL setOutputValue(2, (T_vfinal - T_k))
!CALL setOutputValue(3, C_w)
!CALL setOutputValue(4, AH)
CALL setOutputValue(4, LAI)
!CALL setOutputValue(5, RH_i)
CALL setOutputValue(5, AH_gain)
!CALL setOutputValue(6, C_ppm)
CALL setOutputValue(6, C_c_ppm)

```

```

!Now need to update the state vector:

```

```

CALL setDynamicArrayValueThisIteration(1, (T_vfinal-T_k)) !NOTE Stored as degC
!CALL setDynamicArrayValueThisIteration(2, C_w)

```

```

CALL setDynamicArrayValueThisIteration(3, C_c)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(4, C_buf)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(5, C_fruit)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(6, C_leaf)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(7, C_stem)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(8, R_fruit)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(9, R_leaf)
CALL setDynamicArrayValueThisIteration(10, R_stem)

!Now return control to the TRNSYS kernel:
!-----

      RETURN
    END SUBROUTINE
!-----

!Calculates the saturated C_w for a particular T_i
DOUBLE PRECISION FUNCTION SATCONC(T)
  DOUBLE PRECISION spec_hum, air_dens, T
  spec_hum = EXP(1156.0d-2 - 4030.0d0 / (T - 38.15d0))
  air_dens = 12978.0d-4 - 0.0046d0*(T - 273.15d0)
  SATCONC = spec_hum * air_dens
  RETURN
END

```

Modèle de laitues

L'algorithme du modèle de laitues proposé par Graamans et al. (2017) a été programmé dans le logiciel MATLAB dans le cadre de ce mémoire. L'algorithme proposé n'a pas été modifié.

```

% Algorithm coded as presented in Gramaans (2017)
% (Missing informations have been get in his thesis : VERTICAL The
% re-developpement of vacant urban structures into viable food production
% centres utilising agricultural production techniques)

% Coded by Marie-Hélène Talbot (École de technologie supérieure)
% Created 05-2018 as TRNSYS component (Type 204)

clear all
clc

RH = [70 72 74 76 78 80]; % EN %
Pdel = [0 168];
Ta = [19 20 21 22 23 24];

LAI=[2.1 10];

for m=1:2

for k=1:2
  for j=1:6 % RH
    for i=1:6 % Ta

      rho_a = 1.2; %Air density [kg/m^2]

```

```

c_p = 1.006; % Air specific heat capacity [kJ/kgK]
lambda = 2489; % Latent heat vapor of water [kJ/kg]
gamma = 66.5; % Psychometric constant [Pa/K]
rho_pl = 0.05; % Lettuce reflectivity

LED_eff = 0.52;

CAC = 0.95;

PPFD = Pdel*LED_eff*5; %nu_mol/m^2*s % Ratio de 5 provient des résultats de Gramaans

I_light = LED_eff*Pdel(k); %W/m^2
Q_light(k) = Pdel(k)-I_light;
Rnet = (1-rho_pl)*I_light*CAC;
q_loss = I_light-Rnet; %Partie réfléchie mais aussi non-absorbée car CAC = 0.95

trueTs = 21-0.4914954;

r_a = 100; % s/m %r_a=350*(1/U_inf)^(0.5)/LAI;
r_s = 60*(1500+PPFD(k))/(200+PPFD(k));

%Hypothèse
Ts(i,j)=Ta(i)-2;
Result(i,j) = 1; %Pour entrer dans la boucle

while Result(i,j)>0.0001

    Ts(i,j)=Ts(i,j)+0.0001;

    e_star = 0.611*exp(17.4*Ta(i)/(Ta(i)+239));

    Xa_star = rho_a*c_p/lambda/(gamma/1000)*e_star*1000; %[g/m^3]

    e = RH(j)/100*e_star;

    Xa = 7.4*e; %[g/m^3]

    delta = 0.04145*e^(0.06088*Ta(i));

    epsilon = delta/(gamma/1000);

    Xs = Xa_star+rho_a*1000*c_p/lambda*epsilon*(Ts(i,j)-Ta(i));

    q_lat{k,m}(i,j) = LAI(m)*lambda*(Xs-Xa)/(r_s+r_a);

    q_sens{k,m}(i,j) = LAI(m)*rho_a*c_p*(Ts(i,j)-Ta(i))/r_a*1000;%W/m^2

    Result(i,j)=Rnet-q_sens{k,m}(i,j)-q_lat{k,m}(i,j);

end
end
end
end
end

```

ANNEXE IV

FLUX DE CHALEUR DES LAITUES

Afin d'assister le processus de conception, les flux de chaleur sensible et latent des laitues utiles à l'estimation des charges sont présentés sous forme de tableaux pour un de LAI de 2.1 (Tableau-A IV-1 et Tableau-A IV-2) et de 10 (Tableau-A IV-3 et Tableau-A IV-4).

Tableau-A IV-1 Flux de chaleur sensible en W/m² lors de la respiration (LAI = 2.1)

		Humidité relative, %					
		70	72	74	76	78	80
Température, °C	19	-37	-34	-32	-29	-26	-24
	20	-39	-36	-33	-30	-27	-25
	21	-41	-38	-34	-31	-28	-26
	22	-42	-39	-36	-33	-29	-26
	23	-44	-40	-37	-34	-30	-27
	24	-45	-41	-38	-34	-31	-28

Tableau-A IV-2 Flux chaleur latente en W/m² lors de la photosynthèse sous éclairage artificiel (437 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$) (LAI=2.1)

		Humidité relative, %					
		70	72	74	76	78	80
Température, °C	19	84	80	75	71	67	63
	20	88	83	79	74	70	66
	21	92	87	82	78	73	69
	22	95	90	85	81	76	72
	23	99	94	89	84	79	75
	24	102	97	92	87	82	77

Tableau -A IV-3 Flux de chaleur sensible en W/m² lors de la respiration (LAI = 10)

		Humidité relative, %					
		70	72	74	76	78	80
Température, °C	19	-177	-164	-151	-138	-125	-112
	20	-186	-172	-158	-144	-130	-117
	21	-194	-179	-164	-150	-136	-122
	22	-201	-186	-170	-155	-140	-126
	23	-208	-192	-176	-160	-145	-129
	24	-214	-197	-181	-164	-148	-132

Tableau-A IV-4 Flux chaleur latente en W/m² lors de la photosynthèse sous éclairage artificiel (437 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}_{\text{cultivé}}$) (LAI=10)

		Humidité relative, %					
		70	72	74	76	78	80
Température, °C	19	322	299	276	254	232	210
	20	339	309	286	263	240	218
	21	355	319	295	271	247	224
	22	371	332	303	278	253	230
	23	386	344	309	283	258	234
	24	400	354	314	287	262	237

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, Z. W., & Caplow, T. (2012). Vertically integrated greenhouse: Google Patents.
- Ahn, B.-L., Jang, C.-Y., Leigh, S.-B., Yoo, S., & Jeong, H. (2014). Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings. *Applied Energy*, 113(Supplement C), 1484-1489. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.050>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913006946>
- Ainsworth, E. A., & Rogers, A. (2007). The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, cell & environment*, 30(3), 258-270.
- ASHRAE. (2007a). *Air Conditioning System Design Manual (Second Edition)*. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- ASHRAE. (2007b). Chapter 4 - Load Calculations. Dans *Air Conditioning System Design Manual (Second Edition)* (pp. 63-77). Burlington: Butterworth-Heinemann. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-193374213-7.50006-X>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978193374213750006X>
- ASHRAE. (2010a). Energy standard for buildings except low-rise residential buildings. *ASHRAE Standard 90.1-2010*.
- ASHRAE. (2010b). *Standard 62.1-2010 (2010). ventilation for acceptable indoor air quality, atlanta, ga.*
- ASHRAE. (2011). ASHRAE Handbook - HVAC Applications : Environmental Control for Animals and Plants. Dans. Repéré à <http://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009EBQL5/ashrae-handbook-heating/ashrae-han-environmental>
- ASHRAE. (2013a). *ASHRAE Handbook - Fundamentals : Climatic design information*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Repéré à <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEC1/ashrae-handbook-fundamentals/ashrae-handbook-fundamentals>
- ASHRAE. (2013b). *ASHRAE Handbook - Fundamentals : Nonresidential cooling and heating load calculations & Energy estimating and modeling methods*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Repéré à <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEC1/ashrae-handbook-fundamentals/ashrae-handbook-fundamentals>
- Aye, L., Fuller, R. J., & Canal, A. (2010). Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(1), 202-208. doi:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.07.002>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1290072909001574>

Baille, A. (1997). Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates. Dans *International Symposium Greenhouse Management for Better Yield & Quality in Mild Winter Climates* 491 (pp. 37-48).

Bastien, D. (2015). *Methodology for Enhancing Solar Energy Utilization in Solaria and Greenhouses* (Concordia University). (library:980775). Repéré à <http://spectrum.library.concordia.ca/980775/>

Bell, A. A. (2000). *HVAC: Equations, Data, and Rules of Thumb*. McGraw-Hill. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=2nMw5-3VvdUC>

Benis, K., Gomes, R., Vicente, R., Ferrão, P., Fernández, J., & Scartezzini, J.-L. (2015). *Rooftop greenhouses: LCA and energy simulation*.

Benis, K., Reinhart, C., & Ferrão, P. (2017). Development of a simulation-based decision support workflow for the implementation of Building-Integrated Agriculture (BIA) in urban contexts. *Journal of Cleaner Production*, 147, 589-602. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.130>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617301452>

Brechner, M., Both, A., & Staff, C. (1996). *Hydroponic Lettuce Handbook*.

Castilla, N. (2013). *Greenhouse technology and management*. Cabi.

Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Pedersen, C. O., & Winkelmann, F. C. (2000). Energy plus: energy simulation program. *ASHRAE journal*, 42(4), 49-56.

DCA. (2018). *Indoor Farming: Ensuring High Yield, High Quality Crops with Custom Dehumidification and Air Quality Systems*.

De Zwart, H. F. (1996). *Analyzing energy-saving potentials in greenhouse cultivation using a simulation model* (Ph. D. Dissertation, Wageningen University, Wageningen).

Despommier, D. (2013). Farming up the city: the rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology*, 31(7), 388-389. doi: 10.1016/j.tibtech.2013.03.008. Repéré à http://ac.els-cdn.com/S016777991300070X/1-s2.0-S016777991300070X-main.pdf?_tid=998ecb80-b0fc-11e6-a47d-00000aab0f01&acdnat=1479851143_d2fe45420fd0fc0b037ff9693516994e

Dorais, M. (2003). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. Dans.

- ESRL. (2018). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Repéré à <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>
- Fraile-Robayo, R. D., Álvarez-Herrera, J. G., Reyes M, A. J., Álvarez-Herrera, O. F., & Fraile-Robayo, A. L. (2017). Evaluation of the growth and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in a closed recirculating hydroponic system. *Agronomía Colombiana*, 35, 216-222. Repéré à http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652017000200216&nrm=iso
- Garzoli, K. (1985). *Collection efficiency of self-contained solar greenhouses* présentée à 9th International Solar Energy Congress, Montreal, Canada.
- Garzoli, K. (1989). *Energy efficient greenhouses : Energy Saving in Protected Cultivation*. ISHS.
- Gomes, R., Benis, K., Silva, C., & Vicente, R. (2016). *Analysis of the Effect of a Rooftop Greenhouse in Building Indoor Temperature and Acclimatization Needs Using Building Energy Simulation*.
- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., & Stanghellini, C. (2018). Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160(Supplement C), 31-43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.11.003>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X17307151>
- Graamans, L., van den Dobbelsteen, A., Meinen, E., & Stanghellini, C. (2017). Plant factories; crop transpiration and energy balance. *Agricultural Systems*, 153(Supplement C), 138-147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.003>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16306515>
- Ha, T., Lee, I.-b., Kwon, K.-s., & Hong, S.-W. (2015). Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using building energy simulation model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(6), 116-127.
- Hanan, J. J. (1997). *Greenhouses: advanced technology for protected horticulture*. CRC press.
- Hézar, P., Swathy, S., Poughon, L., Fontaine, J.-P., & Dussap, C.-G. (2012). *Experimental setup, modeling design and preliminary results for higher plant growth control in the bioregenerative life support systems* présentée à 42nd International Conference on Environmental Systems 2012, ICES 2012. doi: 10.2514/6.2012-3523
- Jarvis, P. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 273(927), 593-610.

- Joliet, O. (1994). HORTITRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 57(1), 23-37. doi: <https://doi.org/10.1006/jaer.1994.1003>. Repéré à <http://www.science-direct.com/science/article/pii/S0021863484710031>
- Kavanaugh, S. P. (2006). *HVAC Simplified*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=DErcAAAACAAJ>
- Kıyan, M., Bingöl, E., Melikoğlu, M., & Albostan, A. (2013). Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink. *Energy Conversion and Management*, 72, 147-155. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.036>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413001222>
- Klein, S., Beckman, W., Mitchell, J., Duffie, J., Duffie, N., Freeman, T., . . . Kummer, J. (2017). TRNSYS 18. A TRaNsient SYstem Simulation Program; Standard Component Library Overview vol. 3. *Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA*.
- Kokogiannakis, G., & Cooper, P. (2015). Evaluating the environmental performance of indoor plants in buildings. Dans *14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings* (pp. 712-719). Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84976417941&partnerID=40&md5=df44a4e60b6d4cb7e9f471510b6245b6>
- Kozai, T., Niu, G., & Takagaki, M. (2015). *Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production*. Academic Press.
- Lazzarin, R., Castellotti, F., & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12), 1260-1267.
- Lazzarin, R., & Nalini, L. (2004). *Air Humidification: Technical, Health and Energy Aspects*. Carel SpA.
- McCartney, L., & Lefsrud, M. (2018). Protected Agriculture in Extreme Environments: A Review of Controlled Environment Agriculture in Tropical, Arid, Polar, and Urban Locations.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. Dans *Symp. Soc. Exp. Biol* (Vol. 19, pp. 4).
- Nadal, A., Llorach-Massana, P., Cuerva, E., López-Capel, E., Montero, J. I., Josa, A., . . . Royapoor, M. (2017). Building-integrated rooftop greenhouses: An energy and environmental assessment in the mediterranean context. *Applied Energy*, 187, 338-351.

- doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.051>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916316361>
- Noguchi, K., & Yoshida, K. (2008). Interaction between photosynthesis and respiration in illuminated leaves. *Mitochondrion*, 8(1), 87-99.
- Ntinas, G. K., Fragos, V. P., & Nikita-Martzopoulou, C. (2014). Thermal analysis of a hybrid solar energy saving system inside a greenhouse. *Energy Conversion and Management*, 81, 428-439. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.058>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414001770>
- Ohyama, K., & Kozai, T. (1998). Estimating Electric Energy Consumption and its Cost in a Transplant Production Factory with Artificial Lighting : A Case Study. *Shokubutsu Kojo Gakkaishi*, 10(2), 96-107. doi: 10.2525/jshita.10.96
- Pamungkas, A. P., Hatou, K., & Morimoto, T. (2014). Evapotranspiration model analysis of crop water use in plant factory system. *Environmental Control in Biology*, 52(3), 183-188.
- Puri, V., & Caplow, T. (2009). How to grow food in the 100% renewable city: Building-integrated agriculture. *100% renewable: Energy autonomy in action*.
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & van den Dobbelsteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610-623. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115000994>
- Royal Philipps, N. (2018). Horticulture LED solutions GreenPower LED toplighting. Repéré à http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/Global/Horticulture/ODLI20180806_001-UPD-en_AA-PS_toplighting_1-2_vegetables_EN_442294264631_B_LR-05-2018.pdf
- Sethi, V. P., Sumathy, K., Lee, C., & Pal, D. S. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Solar Energy*, 96, 56-82. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.034>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13002648>
- Spitler, J. D. (2014). *Load calculation applications manual*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- Stanghellini, C. (1987). *Transpiration of greenhouse crops. An aid to climate management* (IMAG).

- Stanghellini, C. (1996). *Transpiration of greenhouse crops : An aid to climate management*. (Wageningen Agricultural University).
- Tadili, R., & Dahman, A. S. (1997). Effects of a solar heating and climatisation system on agricultural greenhouse microclimate. *Renewable Energy*, 10(4), 569-576. doi: [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(96\)00036-5](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(96)00036-5). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148196000365>
- Talbot, M., & Monfet, D. (2018, 9-10 May 2018). *Impact des plantes sur les charges d'un espace d'agriculture intégré au bâtiment : Implantation d'un modèle de plantes* présentée à eSIM 2018, Montreal.
- Tei, F., Scaife, A., & Aikman, D. P. (1996). Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. *Annals of Botany*, 78(5), 633-643. doi: 10.1006/anbo.1996.0171. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1006/anbo.1996.0171>
- Thom, A., & Oliver, H. (1977). On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103(436), 345-357.
- Vanthoor, B. H. E., de Visser, P. H. B., Stanghellini, C., & van Henten, E. J. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 2, description and validation of a tomato yield model. *Biosystems Engineering*, 110(4), 378-395. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.005>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511011001413>
- Vanthoor, B. H. E., Stanghellini, C., van Henten, E. J., & de Visser, P. H. B. (2011). A methodology for model-based greenhouse design: Part 1, a greenhouse climate model for a broad range of designs and climates. *Biosystems Engineering*, 110(4), 363-377. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.06.001>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511011000948>
- Wang, J., Lu, W., Tong, Y., & Yang, Q. (2016). Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light. *Frontiers in plant science*, 7, 250.
- Ward, R., & Choudhary, R. (2014). A bottom-up energy analysis across a diverse urban building portfolio: retrofits for the buildings at the Royal Botanic Gardens, Kew, UK. *Building and Environment*, 74, 132-148. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.018>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313003740>
- Ward, R., Choudhary, R., Cundy, C., Johnson, G., & McRobie, A. (2015). Simulation of plants in buildings; incorporating plant-Air interactions in building energy simulation. Dans

14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings (pp. 2256-2263). Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84976434544&partnerID=40&md5=18cb1e129eb06dce0f74473c4ae5ae4c>

Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11(41), 41-76.

Yeh, N., & Chung, J.-P. (2009). High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 2175-2180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.01.027>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109000471>

